



**Somos calidad,
somos USC**

Efectos de los pesticidas persistentes sobre la microbiota del suelo, sus impactos en la estructura y función microbiana: Revisión sistemática

Autor

Geraldine Silva López

**Título por el que opta
Microbióloga**

Director

Jonathan Arturo Bautista Carrillo

Grupo de Investigación

GIMIA Grupo de Investigación en Microbiología, Industria y Ambiente

**Línea de Investigación
Microbiología ambiental**

Facultad de Ciencias Básicas

Microbiología

Universidad Santiago de Cali

Santiago de Cali - Colombia

2025

IMPACTOS

Relacione el (los) impacto(s) que presentó el Trabajo de Grado según los siguientes criterios:

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Responsabilidad social	Contribución a la comprensión y concientización el uso de pesticidas y sus impactos en los suelos y ecosistemas agrícolas	Comunidad en general, entidades regulatorias.
Científico	Contribución del conocimiento evidenciando los efectos de los pesticidas sobre la microbiota del suelo	Investigadores, estudiantes de Microbiología
Tecnológico	Evaluación y propuesta que puede servir de base para el desarrollo de futuras tecnologías de monitoreo o evaluación de impacto microbiológico	Investigadores, tecnólogos ambientales, laboratorio de análisis de suelos
Técnico Ambiental	Sistematización de los métodos de evaluación de la actividad microbiana y enzimática en los suelos contaminados por pesticidas	Autoridades ambientales, comunidades rurales

Efectos de los pesticidas persistentes sobre la microbiota del suelo, sus impactos en la estructura y función microbiana: Revisión sistemática

Geraldine Silva López¹ (geraldine.silva00@usc.edu.co)

¹ Grupo de Investigación en Microbiología, Industria y Ambiente., Programa de Microbiología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda, Calle 5 #62-00. Santiago de Cali. Colombia.

RESUMEN

Esta monografía aborda los efectos que la exposición prolongada a pesticidas genera sobre la actividad biológica del suelo y su equilibrio ecológico. El suelo constituye un ecosistema complejo donde interactúan microorganismos, enzimas y componentes minerales que garantizan la fertilidad y la estabilidad ambiental. Sin embargo, la aplicación continua de pesticidas ha alterado de manera significativa su estructura y funcionalidad. El objetivo fue identificar los principales factores que favorecen esta persistencia a través de una revisión sistemática de la literatura, basada en los lineamientos de la metodología PRISMA. La búsqueda se realizó en cinco bases de datos, donde se identificaron 2346 artículos. Tras eliminar 882 estudios duplicados, se evaluaron 1464 documentos. De estos, se preseleccionaron 1222 según título y resumen. Posteriormente, 242 documentos fueron evaluados por texto completo, de los cuales 166 se excluyeron al no cumplir los criterios de inclusión establecidos. Se evaluó finalmente un total de 76 artículos, y 9 de ellos se descartaron por falta de información metodológica. Se obtuvieron 67 estudios para realizar la revisión. De los estudios finalmente seleccionados, 9 correspondieron a nuevas incorporaciones derivadas de referencias secundarias, alcanzando un total de 76 investigaciones incluidas en la revisión sistemática.

Los resultados señalan que la exposición prolongada a pesticidas produce efectos acumulativos que alteran de manera significativa la estructura y funcionalidad de la microbiota del suelo. Las evidencias reunidas demuestran que la aplicación constante de estos compuestos químicos que conforman los pesticidas modifica la composición microbiana, reduciendo la abundancia de especies sensibles e incrementando la presencia de microorganismos resistentes con menor capacidad metabólica. Este cambio en la comunidad microbiana afecta la descomposición de la materia orgánica, el reciclaje de nutrientes y la estabilidad de los ciclos biogeoquímicos, lo que se traduce en una disminución progresiva de la calidad microbiológica del suelo.

Palabras clave: *Pesticidas, microbiota del suelo, actividad enzimática, contaminación del suelo, toxicidad microbiana*

Effects of persistent pesticides on soil microbiota: Impacts on microbial structure and function: A systematic review

ABSTRACT

This monograph addresses the effects of prolonged exposure to pesticide compounds on soil biological activity and its ecological balance. Soil constitutes a complex ecosystem where microorganisms, enzymes, and mineral components interact, ensuring fertility and environmental stability. However, the continuous application of pesticides has significantly altered its structure and functionality. The objective was to identify the primary factors that contribute to this persistence through a systematic review of the literature, based on the PRISMA methodology guidelines. The search was conducted across five databases, resulting in the identification of 2,346 articles. After removing 882 duplicate studies, 1464 documents were evaluated. Of these, 1222 were preselected based on title and abstract. Subsequently, 242 documents were reviewed in full text, of which 166 were excluded for not meeting the established inclusion criteria. A total of 76 articles were initially evaluated, and 9 were excluded due to a lack of methodological information. This resulted in 67 studies being selected for review. Of these, 9 were new additions derived from secondary sources, bringing the total number of studies included in the systematic review to 76.

The results indicate that prolonged exposure to pesticides produces cumulative effects that significantly alter the structure and functionality of the soil microbiota. The evidence gathered demonstrates that the constant application of these chemical compounds that make up pesticides modifies the microbial composition, reducing the abundance of sensitive species and increasing the presence of resistant microorganisms with lower metabolic capacity. This change in the microbial community affects the decomposition of organic matter, nutrient recycling, and the stability of biogeochemical cycles, resulting in a progressive decline in soil microbiological quality.

Keywords: *Pesticides, soil microbiota, enzymatic activity, soil contamination, microbial toxicity*

HIGHLIGHTS

1. Se determinó que la exposición prolongada de pesticidas altera de manera significativa la estructura y la diversidad microbiana del suelo, lo cual reduce una cantidad de poblaciones microbianas que benefician el suelo y aumenta microorganismos resistentes de baja capacidad metabólica.
2. Se determinó que hay inhibición de enzimas como la deshidrogenasa, ureasa y fosfatasa, que afecta directamente la fertilidad y las funciones vitales del suelo.
3. Se determinó que la persistencia de los pesticidas y su bioacumulación en el suelo generan un desequilibrio ecológico progresivo que, a largo plazo, impide que este mismo se recupere.

1. INTRODUCCIÓN

El uso constante de pesticidas en la agricultura ha generado una creciente preocupación por las consecuencias ambientales, especialmente por la alteración del ecosistema que conforma el suelo. Los suelos son unos de los ecosistemas vitales más complejos del planeta Tierra, donde se relacionan procesos físicos, químicos y biológicos que conforman la productividad agrícola y ambiental. En este entorno, la microbiota del suelo cumple un papel esencial en la degradación y descomposición de la materia orgánica, actuando como un sistema de reciclaje de nutrientes y la regulación de los ciclos biogeoquímicos (Swaine et al., 2025; Ruuskanen et al., 2023).

No obstante, el aumento del uso de pesticidas en los últimos tiempos ha generado alteraciones marcadas y profundas, tanto en la estructura como en la funcionalidad del ecosistema del suelo, lo cual ha modificado la composición de la vida microbiana y reduce la resiliencia ecológica del suelo (van Rijssel et al., 2022; Maharana et al., 2025).

Los pesticidas son reconocidos por su estabilidad y persistencia en el ecosistema del suelo, lo cual indica que pueden permanecer activos y presentes por un largo periodo de tiempo en el suelo después de su aplicación. Esta propiedad que es útil para controlar plagas por un mayor tiempo también representa un riesgo y amenaza a la microbiota del suelo, ya que estos compuestos son absorbidos e interfieren con la actividad microbiana del suelo, alterando las rutas metabólicas (Zhang et al., 2023; Mauser et al., 2024).

La acumulación de pesticidas en el suelo depende de múltiples factores, entre ellos la textura, el contenido de materia orgánica, el pH y las condiciones climáticas, los cuales influyen directamente en los procesos de adsorción, desorción y degradación, lo que, a su vez, define su persistencia y disponibilidad en la matriz del suelo. (Schäffer & Wijntjes, 2022; Gandhi et al., 2021). Además, la aplicación de distintos pesticidas puede generar mezclas con efectos sinérgicos o antagónicos que alteran los patrones normales de degradación, incrementando la toxicidad general del ecosistema del suelo (Mauser et al., 2024).

A nivel microbiológico, la exposición continua a los pesticidas puede favorecer la prevalencia de los microorganismos resistentes y provocar la pérdida de especies sensibles, reduciendo así la variedad de microorganismos, lo que conlleva a la pérdida de la funcionalidad de los ciclos biogeológicos como el del carbono, nitrógeno y fósforo (Ni et al., 2025; Wen et al., 2025). Asimismo, se ha observado que la diversidad microbiana disminuye conforme aumenta la frecuencia y la intensidad de las aplicaciones químicas, lo que reduce la capacidad de autorregulación ecológica y la recuperación del sistema ante nuevas perturbaciones (Riedo et al., 2025; Swaine et al., 2025).

Estos cambios no solo afectan la composición de bacterias y hongos, sino también la interacción entre los distintos niveles tróficos del suelo, alterando la dinámica de protozoos y actinomicetos (Steiner et al., 2024; Streletskii et al., 2023). De igual manera, se ha podido demostrar que los pesticidas influyen en la relación entre microbiota y enzimas claves en el suelo, como son las deshidrogenasas, ureasas y fosfatasas (Swaine et al., 2025).

La exposición continua a estos compuestos también impacta los procesos enzimáticos del suelo, que funcionan como indicadores biológicos de su salud. La inhibición de enzimas clave refleja la disminución del metabolismo microbiano y la alteración de los ciclos de energía y nutrientes, comprometiendo la capacidad del suelo para autorregularse frente a perturbaciones externas (Riedo et al., 2025).

Con el tiempo, estos efectos se traducen en una degradación progresiva de la microbiota del suelo, en pérdida de fertilidad y en la disminución de la resiliencia ecológica frente a nuevos contaminantes (Wang et al., 2020; Khmelevtsova et al., 2023). Todas estas alteraciones influyen directamente en la pérdida del ecosistema del suelo.

Por su parte, el carácter acumulativo de los pesticidas hace que estos actúen no solo sobre los microorganismos, sino también sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, modificando su estructura, su capacidad de intercambio catiónico y su retención de agua. El conjunto de todas estas alteraciones genera un desequilibrio biogeoquímico en general, causando que las funciones vitales del suelo, como son la descomposición de materia orgánica e inmovilización de metales, estén comprometidas (Maharana et al., 2025).

A pesar de que hay avances, aún existen vacíos de conocimiento sobre los mecanismos específicos mediante los cuales los pesticidas alteran la microbiota del suelo y su actividad enzimática. La mayoría de los estudios e investigaciones, se enfocan en la degradación química de estos compuestos, solo muy pocos estudios se centran de manera esencial en los efectos microbiológicos y bioquímicos ante la exposición de estos compuestos químicos (Swaine et al., 2025).

Por lo anterior, es fundamental para plantear estrategias basadas en la ecología microbiana y que sean sostenibles para el medio ambiente, reducir la aplicación de pesticidas para promover un manejo ecológico y responsable. (Vickneswaran et al., 2023) Por eso, esta monografía propone una revisión sistemática de la literatura con el objetivo de identificar y analizar los efectos de los pesticidas persistentes sobre la microbiota del suelo, y cómo estas alteran su estructura y la función microbiana.

La estructura del documento se divide en tres partes: interacción de pesticidas con la microbiota del suelo, la actividad enzimática de la microbiota del suelo y las estrategias de recuperación del ecosistema del suelo.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente monografía se empleó un enfoque analítico-descriptivo, dado que se fundamenta en la recolección, organización y análisis de información científica disponible en la literatura especializada. El propósito fue identificar y evaluar los principales factores relacionados con los efectos de los pesticidas persistentes sobre la microbiota del suelo, considerando tanto los cambios en su estructura como en sus funciones ecológicas. Para ello se aplicó la metodología de Revisión Sistemática (RS) (Begoña et al. 2018), que permitió realizar una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas y científicas, aplicando criterios de inclusión y exclusión previamente definidos para garantizar la calidad y pertinencia de las fuentes seleccionadas.

Además, el proceso posibilitó recopilar, comparar y sintetizar los hallazgos reportados en estudios experimentales seleccionados, estableciendo una base de conocimiento sólida sobre la interacción entre pesticidas persistentes y comunidades microbianas del suelo. De esta manera, se consolidó un marco de referencia sustentado en evidencia científica, útil para comprender los riesgos ecológicos asociados.

2.1. Estrategia de búsqueda

Inicialmente, se implementó una estrategia de búsqueda fundamentada en la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Barrios et al., 2021). Para ello, se definieron las palabras clave de acuerdo con los conceptos centrales de los objetivos de la investigación de la monografía (tabla 1). Estas palabras clave se usaron junto a los operadores booleanos, para construir un conjunto de 5 ecuaciones de búsqueda dirigidas a la localización de literatura científica relevante.

Las combinaciones de términos planteadas abarcaron aspectos relacionados con el tipo de pesticida evaluado, suelo estudiado, grupo microbiano afectado, actividad enzimática reportada, así como, los efectos de estos en los resultados principales. Este proceso permitió consolidar la evidencia científica necesaria para el análisis de las interacciones entre pesticidas, microorganismos y procesos enzimáticos del suelo, sobre los cuales se estructura el desarrollo y la discusión de la presente monografía.

La estrategia incluyó tanto bases de datos multidisciplinarias como repositorios especializados de libre acceso, lo que garantizó un rastreo amplio y riguroso de la información. En este proceso se seleccionaron cinco fuentes principales: Scopus, Springer, Science Direct, Nature y Clarivate.

Tabla 1. Palabras claves

PALABRAS CLAVES

Concepto	Palabras claves
Ecological alterations of the soil by pesticides	Soil microbiota
Changes in soil structure associated with microbiota	Soil structure
Factors influencing pesticides persistence	pesticide persistence
Soil microbiota and pesticide contamination	Pesticide residues
	Factors
	Diversity
	Nutrients

Fuente: elaboración propia.

2.2. Criterios de inclusión y exclusión

Entre los criterios de inclusión que formaron parte de esta revisión sistemática están:

- Estudios centrados en la interacción entre pesticidas y microbiota del suelo
- Estudios que aborden los efectos de los pesticidas persistentes sobre la microbiota del suelo: impactos en la estructura y función microbiana.
- Artículos de texto completo en los idiomas inglés y español entre 2020 y 2025. Se incorporaron de forma justificada algunas fuentes anteriores a ese periodo, tales como normativas legales vigentes en Colombia y literatura metodológica de referencia (por ejemplo, textos clásicos de investigación), dada su relevancia y validez académica para el contexto del estudio.
- Se excluyó material bibliográfico que se encuentre en un idioma diferente al inglés y español.
- Se excluye material que no contenga las palabras claves usadas en el filtro de selección y también aquellos que no se centraron en los efectos de los pesticidas persistentes sobre la microbiota del suelo: impactos en la estructura y función microbiana.
- Se excluye literatura no evaluada por pares o cuyos resultados no sean de acceso completo.

2.3. Extracción y análisis de la literatura

En la fase de identificación, se combinaron los resultados de búsqueda en distintas bases de datos, obteniéndose un total de 2.346 artículos. De estos, se eliminaron 882 estudios duplicados usando la plataforma de RAYYAN, quedando 1.464 artículos para la revisión inicial por título y resumen. Durante la fase de selección, se preseleccionaron 242 artículos tras una segunda revisión por texto completo. En esta etapa, se excluyeron los documentos que no aportaban evidencia suficiente o clave que se relacionaban directamente con la temática de análisis y se excluyeron 166 artículos.

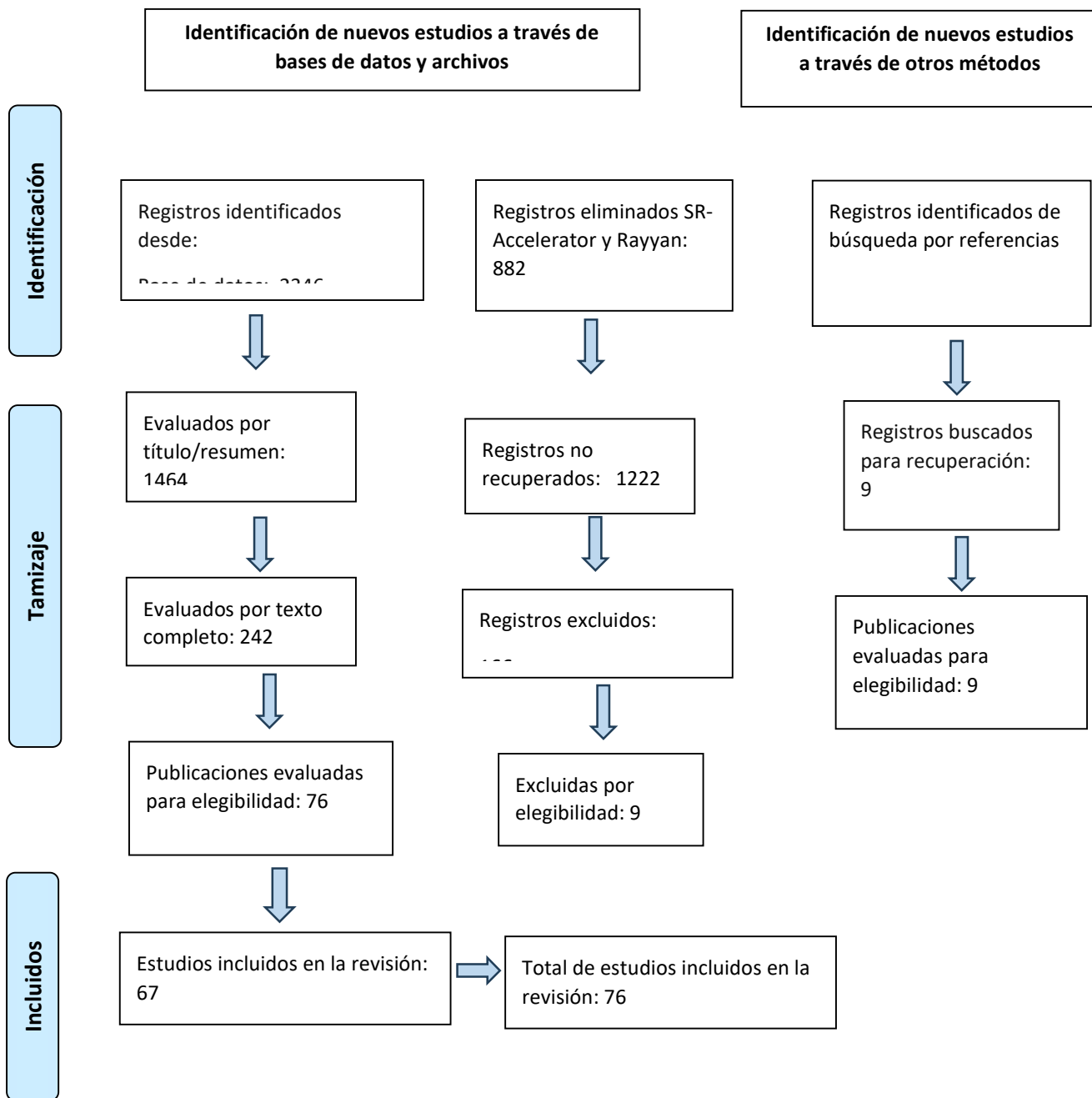
Posteriormente, se procedió a la evaluación de los 76 artículos seleccionados, con el fin de determinar su elegibilidad metodológica y la pertinencia de los resultados presentados. Tras esta revisión detallada, algunos estudios fueron descartados por carecer de información metodológica sólida o por no cumplir con los parámetros establecidos, excluyendo 9 artículos. Finalmente, 67 investigaciones fueron consideradas pertinentes y se incorporaron en la revisión sistemática.

Tabla 2. Combinaciones de las palabras clave con el uso de operadores booleanos.

Palabras claves	Scopus	Springer	Science Direct	Nature	Clarivate	Total
("soil microbial community") AND ("pesticide residues") AND ("microbial diversity" OR "functional diversity")	94	74	238	0	106	512
("diversity changes") AND ("soil microbial community" OR "soil microbiota") AND ("pesticides" OR "persistent pesticides")	230	29	90	0	100	449
("persistent pesticides" OR "pesticide residues") AND ("factors influencing persistence" OR "soil properties") AND ("soil microbiota" OR "microbial community")	0	0	7	0	0	7
("changes in soil structure" OR "soil nutrients") AND ("soil microbiota" OR "soil microbial community") AND ("pesticides" OR "persistent pesticides")	107	257	329	8	2	703
("soil microbiota" OR "soil microorganisms") AND ("pesticide contamination" OR "pesticide residues") AND ("soil nutrients" OR "diversity changes")	54	172	433	9	7	675
Notas aclaratorias: tipo de estudio (artículos de investigación, artículos de revisión, tesis); población (Global); fecha de publicación (entre los años 2020 y 2025); idiomas (español e inglés). Se realizaron los ajustes a las ecuaciones para homogenizar la búsqueda en cada base de datos						

Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA



Fuente: Elaboración propia., 2025

Tabla 3. extracción de información para análisis de calidad de los estudios.

Nº	Autor	Título	Contexto (tipo de pesticida, suelo, etc.)	Microorganismos asociados	Impacto ambiental (negativo/postivo)	Implicación ecológica
1	(Astaykina et al., 2020)	The Impact of Pesticides on the Microbial Community of Agrosoddy-Podzolic Soil	Ensayo en suelo Agrosoddy-Podzólico tratado con mezclas de pesticidas convencionales; análisis de variaciones microbianas por exposición repetida.	<i>Actinobacteria</i> , <i>Proteobacteria</i> , y microorganismos del ciclo del carbono.	Negativo: se redujo la biomasa microbiana y se observaron cambios estructurales significativos.	Los pesticidas alteran la composición microbiana y reducen la resiliencia del suelo, dificultando la recuperación ecológica tras la exposición.
2	(Balázs et al., 2020)	Development of microbial communities in organochlorine pesticide contaminated soil: A post-reclamation perspective	Investigación sobre suelos contaminados con pesticidas organoclorados luego de procesos de restauración.	Bacterias degradadoras como <i>Pseudomonas</i> y <i>Rhodococcus</i> .	Positivo parcialmente: se evidenció recuperación microbiana después de biorremediación, aunque persistieron residuos tóxicos.	La biorremediación con microorganismos puede restablecer parcialmente la función ecológica del suelo, pero no elimina completamente los efectos históricos de pesticidas persistentes.
3	(Benoit et al., 2023)	Pesticide fate in soils	Análisis sobre el destino y transporte de pesticidas en suelos agrícolas y naturales; análisis de volatilización, lixiviación y degradación microbiana.	No enfocado en especies concretas; abarca comunidades microbianas del suelo involucradas en degradación y transformación de pesticidas.	Neutro: describe procesos tanto de contaminación como de atenuación natural por acción microbiana.	Muestra que la interacción suelo–microorganismo es clave en el destino de pesticidas, y que la degradación depende fuertemente de las condiciones fisicoquímicas del suelo.
4	(Chaudhary et al., 2024)	Strategies for mitigation of pesticides from the environment through alternative approaches: A review of recent developments and future prospects	Análisis de estrategias alternativas para mitigar el uso de pesticidas mediante biopesticidas, microorganismos degradadores y fitorremediación.	<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Trichoderma</i> , y otras especies con capacidad biodegradadora.	Positivo: promueve enfoques biológicos y sostenibles para reducir contaminación y restaurar funciones del suelo.	Destaca la importancia del manejo integrado de pesticidas basado en microbiología aplicada como vía hacia una agricultura regenerativa.

5	(Dar et al.,2022)	Chapter 24 - Natural compounds for bioremediation and biodegradation of pesticides	Capítulo de libro sobre biocompuestos naturales para biodegradación de pesticidas orgánicos e inorgánicos.	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> .	Positivo: evidencia que metabolitos y enzimas microbianas pueden degradar residuos tóxicos eficientemente.	Refuerza el valor del uso de compuestos naturales y microorganismos como agentes ecológicos de limpieza frente a contaminantes químicos.
6	(Dhuldhaj et al., 2023)	Pesticide contamination in agro-ecosystems: toxicity, impacts, and bio-based management strategies	Análisis de la contaminación por pesticidas en agroecosistemas y de estrategias biológicas para su manejo.	Diversas comunidades microbianas del suelo implicadas en los ciclos del carbono, nitrógeno y fósforo.	Mixto: documenta impactos negativos (pérdida de biodiversidad microbiana) y positivos (potencial restaurador de biotecnologías).	Subraya que la biotecnología microbiana puede revertir parcialmente la pérdida de funciones ecosistémicas causada por la contaminación crónica.
7	(Drocco et al.,2025)	Evaluating the effects of environmental disturbances and pesticide mixtures on N-cycle related soil microbial endpoints	Estudio experimental sobre mezclas de pesticidas y disturbios ambientales en procesos del ciclo del nitrógeno en suelos agrícolas.	Microorganismos nitrificantes y fijadores de N: <i>Nitrosospira</i> , <i>Nitrobacter</i> , <i>Azotobacter</i> .	Negativo: alteración significativa de los procesos de nitrificación y fijación, reduciendo la eficiencia biogeoquímica del suelo.	Las mezclas de pesticidas tienen efectos sinérgicos que comprometen la fertilidad biológica del suelo y el balance del ciclo del nitrógeno.
8	(Egbe et al., 2021)	Ecological impact of organochlorine pesticides consortium on autochthonous microbial community in agricultural soil	Estudio en suelos agrícolas tratados con consorcios de pesticidas organoclorados (DDT, lindano, endosulfán). Se evaluó su efecto sobre comunidades microbianas autóctonas.	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Micrococcus</i> , y actinomicetos del suelo.	Negativo: los pesticidas redujeron la abundancia y diversidad microbiana, afectando la actividad enzimática del suelo.	La exposición crónica a organoclorados impacta las comunidades nativas, limitando la capacidad del suelo para regenerarse y degradar contaminantes naturalmente.
9	(Gandhi et al.,2021)	Exposure risk and environmental impacts of glyphosate: Highlights on the toxicity of herbicide co-formulants	Estudio sobre la toxicidad de coformulantes en herbicidas a base de glifosato. Se analizan efectos en organismos del suelo y riesgo ambiental.	Bacterias del suelo sensibles al glifosato y sus aditivos, especialmente <i>Rhizobium</i> y <i>Azospirillum</i> .	Negativo: los coformulantes aumentan la toxicidad general del producto, afectando la viabilidad microbiana y los procesos del ciclo del nitrógeno.	Los resultados advierten que no solo el glifosato, sino también sus aditivos, contribuyen a la disfunción ecológica del suelo agrícola.

10	(Gorodylova et al 2021)	Modified zeolite-supported biofilm in service of pesticide biodegradation	Desarrollo de biofilm soportado en zeolita modificada para mejorar la biodegradación de pesticidas. Se probaron sistemas bioactivos con bacterias degradadoras.	<i>Pseudomonas putida</i> , <i>Rhodococcus erythropolis</i> , y consorcios bacterianos de biofilm.	Positivo: el biofilm mejoró significativamente la degradación de pesticidas y redujo la toxicidad del suelo tratado.	La aplicación de materiales porosos con comunidades microbianas integradas ofrece una alternativa sostenible para la biorremediación dirigida.
11	(Guo et al.,2025)	Occurrence, residue level, distribution and risk assessment of pesticides in the typical polder areas of Lake Dongting	Estudio en zonas de cultivo cercanas al Lago Dongting (China) sobre la presencia y distribución de residuos de pesticidas.	Microbiota del suelo y del agua, incluyendo bacterias nitrificantes y descomponedoras.	Negativo: se encontraron concentraciones elevadas y persistentes de pesticidas en suelos y sedimentos, con riesgo ecológico alto.	La acumulación de residuos en áreas agrícolas semiacuáticas representa una amenaza para la biota microbiana y la salud ambiental del ecosistema.
12	(Han et al., 2023)	Deciphering the degradation characteristics of the fungicides imazalil and penflufen and their effects on soil bacterial community composition, assembly, and functional profiles	Estudio experimental sobre la degradación de los fungicidas imazalil y penflufen y su efecto en la composición bacteriana del suelo agrícola.	<i>Proteobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Firmicutes</i> , especialmente <i>Bacillus</i> y <i>Pseudomonas</i> .	Negativo: ambos fungicidas alteraron significativamente la estructura y función bacteriana, reduciendo la diversidad funcional del suelo.	Los fungicidas sistémicos no solo afectan patógenos, sino también bacterias beneficiosas, comprometiendo la estabilidad del ecosistema microbiano y la degradación natural de residuos.
13	(Jat et al.,2022)	Effect of pesticides on soil ecosystem services and processes	Estudio general sobre los efectos de pesticidas en servicios ecosistémicos del suelo, como la fertilidad, la polinización y el reciclaje de nutrientes.	Comunidades bacterianas, fúngicas y arqueas del suelo agrícola.	Negativo: los pesticidas reducen la biodiversidad y afectan procesos claves como la nitrificación, fijación de N y degradación orgánica.	Subraya que la pérdida de funcionalidad microbiana por uso intensivo de pesticidas puede tener efectos en cascada sobre la productividad y resiliencia del ecosistema.
14	(Khalid et al.,2020)	A critical review of different factors governing the fate of pesticides in soil under biochar application	Estudio sobre el destino de pesticidas en suelos con aplicación de biochar, considerando su capacidad de adsorción y efecto en la microbiota.	<i>Pseudomonas</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Bacillus</i> , y consorcios del suelo agrícola.	Positivo (mitigado): el biochar reduce la movilidad y toxicidad de pesticidas, protegiendo parcialmente las comunidades microbianas.	El uso de biochar puede ser una estrategia ecológica eficaz para reducir los efectos tóxicos de pesticidas y conservar la actividad biológica del suelo.

15	(Khmelevtsova et al.,2023)	Influence of Pesticides and Mineral Fertilizers on the Bacterial Community of Arable Soils under Pea and Chickpea Crops	Estudio en suelos cultivados con arveja y garbanzo, analizando los efectos combinados de pesticidas y fertilizantes minerales sobre bacterias del suelo.	<i>Rhizobium</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Bacillus</i> , y <i>Nitrosomonas</i> .	Mixto: se observó disminución en la abundancia de bacterias beneficiosas y alteración en los procesos de fijación de nitrógeno.	La interacción entre pesticidas y fertilizantes afecta negativamente a microorganismos fijadores, reduciendo la sostenibilidad biológica de sistemas leguminosos.
16	(Li et al 2025)	Contamination remediation and risk assessment of four typical long-residual herbicides: A timely review	Estudio sobre la remediación y evaluación del riesgo de herbicidas de larga persistencia (atrazina, diurón, pendimetalina, y metribuzina) en suelos agrícolas franco-arcillosos.	Comunidades bacterianas degradadoras (<i>Pseudomonas</i> , <i>Sphingomonas</i> , <i>Arthrobacter</i>) y hongos saprofiticos.	Negativo (diagnóstico) / Positivo (propuesta): los herbicidas persistentes muestran alta estabilidad química y bioacumulación, pero se proponen tecnologías biológicas para su degradación.	Los herbicidas de alta residualidad representan una amenaza prolongada para la microbiota del suelo; su manejo requiere estrategias combinadas de biorremediación y reducción de uso.
17	(Li et al., 2025)	Glyphosate and urea co-exposure: Impacts on soil nitrogen cycling	Estudio experimental de coexposición a glifosato (herbicida) y urea (fertilizante nitrogenado) en suelos agrícolas de textura limosa.	<i>Nitrospira</i> , <i>Nitrobacter</i> , <i>Azospirillum</i> , <i>Rhizobium</i> — microorganismos del ciclo del nitrógeno.	Negativo: la combinación alteró la nitrificación y la fijación biológica de nitrógeno, reduciendo la eficiencia de los procesos microbianos.	La interacción entre glifosato y urea genera disfunciones en el ciclo del N, mostrando que las prácticas agrícolas intensivas pueden tener efectos sinérgicos nocivos sobre la microbiota.
18	(Li et al.,2022)	Chapter 15 - Phytoremediation of pesticides in soil	Capítulo de libro sobre fitorremediación de pesticidas (principalmente organofosforados y herbicidas) en suelos agrícolas tropicales y subtropicales.	Microorganismos rizosféricos asociados a plantas hiperacumuladoras (<i>Rhizobium</i> , <i>Burkholderia</i> , <i>Pseudomonas</i>).	Positivo: la interacción planta–microorganismo incrementa la degradación y reducción de residuos tóxicos en el suelo.	La fitorremediación representa una estrategia ecológica viable para recuperar suelos contaminados y estimular la biodiversidad microbiana en la rizosfera.
19	(Loose et al.,2025)	Investigating pesticide contamination in arable soils: An advanced monitoring study from Northern Germany	Estudio de monitoreo avanzado en suelos arables del norte de Alemania, centrado en la distribución y movilidad de pesticidas agrícolas mixtos (principalmente herbicidas e insecticidas).	Comunidades microbianas del suelo agrícola templado, con énfasis en bacterias descomponedoras y nitrificantes.	Negativo: se detectaron residuos persistentes en capas profundas del suelo, afectando la actividad microbiana y aumentando el riesgo de lixiviación.	Los resultados evidencian que los pesticidas modernos siguen siendo bioacumulativos en suelos templados, comprometiendo la funcionalidad microbiana y la calidad ambiental.

20	(Ma et al.,2023)	Exposure to three herbicide mixtures influenced maize root-associated microbial community structure, function and the network complexity	Estudio experimental en suelos agrícolas franco-limosos cultivados con maíz, expuestos a mezclas de tres herbicidas: atrazina, mesotrione y acetoclor (inhibidores de fotosíntesis y síntesis de ácidos grasos).	Microbiota rizosférica del maíz, incluyendo <i>Proteobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Bacteroidetes</i> y hongos micorrízicos.	Negativo: las mezclas alteraron la estructura de la comunidad microbiana y redujeron la complejidad de las redes tróficas.	El uso combinado de herbicidas genera efectos sinérgicos que desestabilizan la rizosfera del maíz, afectando la funcionalidad microbiana y la salud del cultivo.
21	(Ma et al.,2025)	Effects of herbicide mixtures on the diversity and composition of microbial community and nitrogen cycling function on agricultural soil: A field experiment in Northeast China	Experimento de campo en suelos agrícolas del noreste de China (Podzólico), evaluando mezclas de herbicidas (acetoclor, nicosulfuron, atrazina) sobre la diversidad microbiana y el ciclo del nitrógeno.	<i>Nitrosomonas</i> , <i>Nitrospira</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Sphingomonas</i> — microorganismos nitrificantes y degradadores de xenobióticos.	Negativo: disminución de la diversidad alfa y reducción en genes asociados a la nitrificación y desnitrificación.	Los herbicidas combinados alteran el equilibrio del ciclo del nitrógeno, generando pérdida de servicios ecosistémicos esenciales y reducción de fertilidad biológica del suelo.
22	(Mäder et al., 2024)	Effects of MCPA and difenoconazole on glyphosate degradation and soil microorganisms	Estudio en suelos agrícolas templados (Alemania) sobre la transferencia de residuos de prosulfocarb (herbicida) y boscalid (fungicida) desde hojas de maíz hacia el suelo.	Comunidades bacterianas heterótrofas y hongos descomponedores.	Negativo: los residuos alteraron la respiración del suelo y redujeron la abundancia de microorganismos sensibles, como <i>Streptomyces</i> y <i>Trichoderma</i> .	La deriva de pesticidas desde biomasa vegetal hacia el suelo amplifica la exposición microbiana y compromete los procesos de descomposición orgánica.
23	(Mäder et al.,2025)	Transfer of prosulfocarb and boscalid residues from maize leaves to soil and their effects on soil microorganisms	Evaluación de los efectos combinados de MCPA (herbicida fenoxiacético) y difenoconazol (fungicida triazol) sobre la degradación de glifosato en suelos agrícolas franco-arenosos.	<i>Pseudomonas</i> , <i>Rhizobium</i> , <i>Bradyrhizobium</i> y <i>Actinobacteria</i> implicadas en la degradación del glifosato.	Negativo: los pesticidas secundarios redujeron la tasa de degradación de glifosato y la actividad microbiana asociada.	La coaplicación de herbicidas y fungicidas genera interferencias metabólicas en microorganismos degradadores, prolongando la persistencia de residuos en el suelo.
24	(Maharana et al., 2025)	Repercussions of Prolonged Pesticide Use on Natural Soil Microbiome Dynamics Using Metagenomics Approach	Estudio metagenómico de largo plazo en suelos agrícolas tropicales de la India, expuestos durante más de una década a mezclas de pesticidas sintéticos (organofosforados,	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Aspergillus</i> , comunidades de <i>Proteobacteria</i> y <i>Actinobacteria</i> .	Negativo: uso prolongado redujo la diversidad genética, alteró redes tróficas microbianas y afectó enzimas del ciclo del N.	La presión selectiva por exposición crónica a pesticidas genera pérdida de funciones clave del microbioma, comprometiendo la resiliencia del suelo y aumentando su

			carbamatos y triazoles).			vulnerabilidad química.
25	(Mauser et al.,2024)	Herbicide Effects on Nontarget Organisms, Biodiversity and Ecosystem Functions	Capítulo de revisión sobre efectos de herbicidas (glifosato, dicamba, 2,4-D, atrazina) en organismos no objetivo y suelos agrícolas templados. Tipo de estudio: revisión bibliográfica.	Diversas comunidades del suelo: bacterias degradadoras (<i>Rhizobium</i> , <i>Pseudomonas</i>), hongos micorrízicos y actinomicetos.	Negativo: documenta pérdida de biodiversidad microbiana, inhibición de micorrizas y alteración de la mineralización orgánica.	La evidencia sintetizada confirma que los herbicidas afectan funciones ecosistémicas, mostrando la necesidad de reducir dependencias químicas y promover manejo agroecológico.
26	(McGinley et al.,2023)	Impact of historical legacy pesticides on achieving legislative goals in Europe	Estudio en suelos agrícolas europeos (Irlanda, Reino Unido, Francia) con residuos históricos de pesticidas organoclorados y organofosforados. Tipo de estudio: campo + modelado ambiental.	Comunidades bacterianas y fúngicas degradadoras de compuestos persistentes (<i>Sphingomonas</i> , <i>Burkholderia</i> , <i>Trametes</i>).	Negativo: residuos históricos continúan afectando la actividad enzimática y reducen la regeneración natural de comunidades microbianas.	Los pesticidas de legado mantienen impactos multidecadales sobre la salud del suelo y desafían los objetivos legislativos de sostenibilidad agrícola en Europa.
27	(Ni et al.,2025)	Increasing pesticide diversity impairs soil microbial functions	Estudio de laboratorio y campo sobre diversidad creciente de pesticidas modernos (herbicidas, fungicidas, insecticidas) en suelos franco-arenosos de China oriental.	<i>Proteobacteria</i> , <i>Firmicutes</i> , <i>Bacteroidetes</i> , <i>Acidobacteria</i> ; enzimas asociadas al ciclo del carbono y nitrógeno.	Negativo: alta diversidad química de pesticidas redujo las funciones metabólicas y la estabilidad del microbioma del suelo.	Demuestra que la mezcla simultánea de múltiples pesticidas disminuye la funcionalidad ecológica, generando suelos biológicamente empobrecidos incluso sin exceso de concentración individual.
28	(Omeiri et al.,2022)	Monitoring of Pesticide Residues in Lebanese Vegetables and Agricultural Soils and Their Impact on Soil Microbiological Properties	Estudio de campo en suelos agrícolas del Líbano (franco-arcillosos) dedicados a hortalizas, donde se evaluaron residuos de pesticidas organofosforados, piretroides y carbamatos.	<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Actinobacteria</i> — comunidades relacionadas con la fertilidad y descomposición.	Negativo: la acumulación de residuos redujo la biomasa microbiana y la actividad enzimática del suelo.	Los residuos de pesticidas agrícolas afectan la salud microbiana incluso a concentraciones subletales, disminuyendo la capacidad del suelo para mantener ciclos de nutrientes sostenibles.

29	(Peprah et al.,2025)	Effects of pesticide application on soil bacteria community structure in a cabbage-based agroecosystem in Ghana	Estudio de campo en suelos arenosos de Ghana en un sistema agrícola de repollo, con aplicación repetida de mezclas de pesticidas comerciales (organofosforados e insecticidas piretroides).	<i>Firmicutes</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Proteobacteria</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Streptomyces</i> .	Negativo: la exposición prolongada alteró la estructura bacteriana, reduciendo la diversidad y aumentando la dominancia de especies resistentes.	En agroecosistemas tropicales, el uso intensivo de pesticidas provoca desplazamientos microbianos que deterioran la calidad biológica del suelo y su resiliencia ecológica.
30	(Phian et al.2022)	Chapter 4 - Emerging issues and challenges for microbes-assisted remediation	Capítulo sobre biorremediación asistida por microorganismos para la degradación de herbicidas, insecticidas y fungicidas en distintos tipos de suelo (arenoso, franco y arcilloso).	<i>Pseudomonas</i> , <i>Burkholderia</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Rhodococcus</i> — principales géneros con potencial degradador.	Positivo: resalta el potencial de los consorcios microbianos en la restauración de suelos contaminados.	La aplicación controlada de microorganismos degradadores representa una herramienta viable para la mitigación ecológica de residuos de pesticidas a largo plazo.
31	(Punniyakotti et al.,2025)	Environmental fate and ecotoxicological behaviour of pesticides and insecticides in non-target environments: Nanotechnology-based mitigation strategies	Estudio sobre el destino ambiental y toxicidad de pesticidas e insecticidas en ambientes no objetivo; propone estrategias de mitigación basadas en nanotecnología. Tipo de estudio: revisión científica.	No centrado en especies específicas, pero menciona el impacto sobre microbiota del suelo, algas y bacterias acuáticas.	Negativo (diagnóstico) / Positivo (propuesta): los pesticidas causan toxicidad multisistémica, pero la nanotecnología puede reducir su movilidad y toxicidad.	La integración de nanomateriales biodegradables en la formulación de pesticidas puede minimizar impactos ecológicos y proteger microorganismos benéficos del suelo.
32	(Riedo et al.,2025)	Abrupt versus gradual application of pesticides: effects on soil bacterial and fungal communities	Estudio experimental de invernadero en suelos agrícolas franco-limosos europeos, comparando la aplicación abrupta vs. gradual de pesticidas sintéticos (mezclas de herbicidas, fungicidas e insecticidas de uso común).	<i>Ascomycota</i> , <i>Basidiomycota</i> , <i>Proteobacteria</i> y <i>Firmicutes</i> ; comunidades bacterianas y fúngicas del suelo agrícola.	Negativo: la aplicación abrupta causó pérdidas mayores de diversidad y disfunción microbiana en comparación con la aplicación gradual.	La frecuencia y modo de aplicación de pesticidas es determinante: dosis súbitas provocan perturbaciones drásticas del microbioma, afectando la resiliencia biológica del suelo.
33	(Rinaldy et al.,2025)	Long-term effects of agropharmaceutic (pesticide category) use on soil microbial communities and water resources	Estudio de campo a largo plazo en suelos agrícolas tropicales expuestos por más de 15 años a agrofármacos (pesticidas sistémicos e insecticidas neonicotinoides).	<i>Actinobacteria</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Nitrosospira</i> , <i>Rhizobium</i> , y hongos saprofitos.	Negativo: el uso prolongado redujo la biomasa microbiana y provocó contaminación de aguas subterráneas por lixiviación.	La exposición crónica a pesticidas sistémicos genera un impacto dual en suelos y aguas, erosionando la biodiversidad microbiana y la calidad ambiental a escala regional.

34	(Ruuskanen et al., 2023)	Ecosystem consequences of herbicides: the role of microbiome	Estudio científico sobre las consecuencias ecológicas del uso de herbicidas (glifosato, atrazina, dicamba) en ecosistemas templados y boreales. Tipo de estudio: revisión teórica.	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Mycorrhizal fungi</i> , <i>Cyanobacteria</i> .	Negativo: los herbicidas alteran la simbiosis planta–microorganismo y disminuyen la estabilidad de los ecosistemas agrícolas.	Los herbicidas no solo afectan malezas objetivo, sino que desestructuran interacciones ecológicas clave, comprometiendo servicios ecosistémicos del suelo.
35	(Sandeep et al., 2024)	Chapter 3 - Pesticide biology in soil: Sorption, leaching, and accumulation	Capítulo de libro sobre biología del pesticida en suelos agrícolas: procesos de sorción, lixiviación y acumulación. Tipo de estudio: revisión técnica.	Microbiota del suelo general: <i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Streptomyces</i> , y comunidades fúngicas descomponedoras.	Mixto: describe cómo las propiedades fisicoquímicas del suelo influyen en la movilidad y degradación de pesticidas, con efectos positivos o negativos según condiciones.	Los procesos del suelo determinan el destino de los pesticidas: su persistencia o degradación depende de la interacción entre materia orgánica, textura y microbiota activa.
36	(Sarker et al., 2024)	A critical review of sustainable pesticide remediation in contaminated sites: Research challenges and mechanistic insights	Estudio sobre tecnologías sostenibles de remediación de pesticidas en suelos contaminados industriales y agrícolas. Incluye pesticidas organofosforados, triazoles y herbicidas persistentes. Tipo de estudio: revisión crítica.	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Rhodococcus</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Trichoderma</i> — microorganismos con potencial para biorremediación.	Positivo (propuesta): presenta mecanismos eficientes de degradación biológica mediante bacterias y hongos, reduciendo toxicidad y residuos.	Destaca el papel central de la biotecnología microbiana en la descontaminación sostenible de suelos, proponiendo sistemas integrados biofísico-químicos.
37	Schäffer & Wijntjes (2022)	Changed degradation behavior of pesticides when present in mixtures	Estudio experimental de laboratorio sobre el comportamiento de degradación de pesticidas en mezclas, principalmente herbicidas y fungicidas en suelos agrícolas europeos franco-limosos.	Comunidades bacterianas heterótrofas (<i>Actinobacteria</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Sphingomonas</i>).	Negativo: las mezclas alteraron las rutas enzimáticas de degradación, aumentando la persistencia de los compuestos.	Las interacciones entre pesticidas modifican sus cinéticas de degradación, generando residuos más estables y prolongando el riesgo ecológico del suelo.

38	(Schleiffer & Speiser 2022)	Presence of pesticides in the environment, transition into organic food, and implications for quality assurance along the European organic food chain	Estudio sobre la presencia de pesticidas en la cadena agroalimentaria europea, con énfasis en suelos agrícolas y transición hacia sistemas orgánicos. Tipo de estudio: revisión documental.	No aborda especies específicas; describe efectos sobre comunidades microbianas y bioindicadores de calidad del suelo.	Mixto: reconoce contaminación persistente incluso en sistemas orgánicos, pero menciona reducción gradual tras abandono del uso químico.	Los residuos históricos de pesticidas pueden perdurar años en suelos y cultivos, afectando indirectamente la calidad biológica de la producción orgánica.
39	(Serbent et al., 2021)	Prokaryotic and microeukaryotic communities in an experimental rice plantation under long-term use of pesticides	Estudio experimental de campo en plantaciones de arroz de Brasil (suelos hidromórficos arcillosos), bajo uso prolongado de pesticidas organofosforados e insecticidas neonicotinoides.	Comunidades procarióticas y microeucariotas: <i>Cyanobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Fungi</i> (principalmente <i>Ascomycota</i>).	Negativo: disminución de la diversidad alfa y cambios funcionales en el metabolismo del suelo, con pérdida de resiliencia microbiana.	La exposición continua a pesticidas en sistemas arroceros genera una reorganización funcional del microbioma edáfico, reduciendo su capacidad adaptativa y ecológica.
40	(Shahid et al., 2023)	Pesticide-tolerant microbial consortia: Potential candidates for remediation/clean-up of pesticide-contaminated agricultural soil	Estudio de laboratorio y modelado microbiano sobre suelos agrícolas contaminados con pesticidas organofosforados y carbamatos. Se evaluaron consorcios microbianos tolerantes en suelos franco-arenosos.	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Rhodococcus</i> — consorcios bacterianos con tolerancia y capacidad degradadora.	Positivo: los consorcios mostraron alta eficacia en degradación y recuperación de la actividad biológica del suelo.	Los consorcios microbianos representan una estrategia biotecnológica prometedora para la restauración de suelos contaminados y la reducción del impacto químico residual.
41	(Sharma et al., 2023)	Chapter 17 - Impact of pesticides on microbial diversity	Estudio sobre la degradación de pesticidas mediante bacterias fijadoras de nitrógeno bajo condiciones de estrés abiótico. Tipo de estudio: revisión ecológica aplicada. Suelos agrícolas variados (franco-limosos y arcillosos).	<i>Azospirillum</i> , <i>Rhizobium</i> , <i>Bradyrhizobium</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Bacillus</i> .	Positivo: las bacterias fijadoras de nitrógeno demuestran tolerancia y capacidad de degradación de pesticidas en entornos adversos.	La integración de microorganismos fijadores de N en biorremediación puede mejorar la resiliencia microbiana y restaurar funciones ecosistémicas alteradas por pesticidas.

42	(Sharma et al., 2023)	A review on ecology implications and pesticide degradation using nitrogen fixing bacteria under biotic and abiotic stress conditions	Capítulo de libro que analiza los efectos de pesticidas sintéticos (organofosforados, clorados y triazoles) sobre la diversidad microbiana del suelo agrícola. Tipo de estudio: revisión científica.	<i>Proteobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Firmicutes</i> , hongos saprofiticos.	Negativo: exposición prolongada altera la estructura del microbioma y reduce funciones de mineralización y fijación de N.	El análisis integrador muestra una pérdida de diversidad funcional con el uso repetido de pesticidas, afectando directamente la estabilidad trófica del suelo agrícola.
43	(Siedt et al., 2021)	Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides	Estudio experimental de campo en suelos agrícolas de Alemania (franco-limosos), evaluando el efecto de biochar, compost y paja sobre la retención y destino de pesticidas.	<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Streptomyces</i> ; comunidades microbianas involucradas en la degradación y estabilidad del suelo.	Positivo (condicional): el biochar y el compost reducen la movilidad de pesticidas y mejoran la estructura y actividad microbiana del suelo.	La enmienda orgánica del suelo actúa como un mitigador ecológico, reduciendo la toxicidad y favoreciendo la restauración de funciones microbianas esenciales.
44	(Sim et al., 2020)	Pesticide effects on nitrogen cycle related microbial functions and community composition	Estudio experimental de campo y laboratorio en suelos agrícolas franco-limosos del sur de Europa, sobre el efecto de mezclas de pesticidas en microorganismos del ciclo del nitrógeno (herbicidas e insecticidas de uso común).	<i>Nitrosomonas</i> , <i>Nitrobacter</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> — comunidades nitrificantes y desnitrificantes.	Negativo: los pesticidas redujeron significativamente la actividad de nitrificación y alteraron la composición bacteriana del suelo.	La alteración del ciclo del nitrógeno por pesticidas representa una pérdida funcional grave, afectando la fertilidad natural y la eficiencia biogeoquímica de los suelos agrícolas.
45	(Sim et al., 2023)	Repeated applications of fipronil, propyzamide and flutriafol affect soil microbial functions and community composition: A laboratory-to-field assessment	Ensayo de laboratorio a campo que analizó la exposición repetida a fipronil (insecticida), propyzamide (herbicida) y flutriafol (fungicida) en suelos agrícolas europeos franco-arcillosos.	<i>Proteobacteria</i> , <i>Acidobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i> , hongos saprofiticos y micorrizicos.	Negativo: las aplicaciones reiteradas provocaron disminución de la diversidad alfa y disrupción funcional en la comunidad microbiana.	Las aplicaciones múltiples de pesticidas, incluso en dosis reglamentarias, tienen efectos acumulativos que deterioran progresivamente el equilibrio ecológico del microbioma del suelo.

46	(Steiner et al.,2024)	Effects of pesticides on soil bacterial, fungal and protist communities, soil functions and grape quality in vineyards	Estudio de campo en viñedos europeos (suelos calcáreos y franco-arenosos) sobre el efecto de pesticidas mixtos (fungicidas, herbicidas e insecticidas) en comunidades del suelo.	<i>Bacillus</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Pseudomonas</i> , hongos filamentosos y protistas.	Negativo: se observó reducción en biomasa microbiana y actividad fúngica, afectando además la calidad del fruto (uvas).	La contaminación crónica por pesticidas en viticultura no solo degrada la biota del suelo, sino que afecta indirectamente la productividad y calidad del cultivo.
47	(Streletskii et al.,2023)	Effects of the Pesticides Benomyl, Metribuzin and Imidacloprid on Soil Microbial Communities in the Field	Ensayo de campo en suelos agrícolas rusos (franco-arcillosos) expuestos a benomilo (fungicida), metribuzina (herbicida) e imidacloprid (insecticida).	<i>Actinobacteria</i> , <i>Proteobacteria</i> , <i>Firmicutes</i> y hongos del suelo.	Negativo: los pesticidas redujeron la abundancia de bacterias beneficiosas y la actividad de enzimas del suelo.	El uso combinado de pesticidas con diferentes modos de acción genera efectos sinérgicos adversos sobre el microbioma, limitando la recuperación ecológica del suelo agrícola.
48	(Swaine et al.,2025)	Impact of pesticides on soil health: identification of key soil microbial indicators for ecotoxicological assessment strategies through meta-analysis	Meta-análisis de múltiples estudios globales sobre efectos de pesticidas agrícolas (herbicidas, fungicidas e insecticidas) en distintos tipos de suelo (franco, arcilloso, arenoso). Identifica indicadores microbianos de impacto ecotoxicológico.	<i>Proteobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Trichoderma</i> — considerados bioindicadores.	Negativo (diagnóstico): los pesticidas reducen la diversidad microbiana y las funciones metabólicas relacionadas con el reciclaje de nutrientes.	El meta-análisis resalta que la diversidad bacteriana y fúngica es un indicador sensible de la degradación del suelo por pesticidas, útil para monitoreo ambiental.
49	(Tripathi et al.,2020)	Chapter 2 - Influence of synthetic fertilizers and pesticides on soil health and soil microbiology	Capítulo de libro sobre los efectos combinados de fertilizantes sintéticos y pesticidas (organofosforados, carbamatos, clorados) en suelos agrícolas tropicales. Tipo de estudio: revisión aplicada.	<i>Azotobacter</i> , <i>Rhizobium</i> , <i>Nitrospira</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Aspergillus</i> .	Negativo: el uso combinado de agroquímicos altera la dinámica de nutrientes, disminuye la fijación de nitrógeno y afecta la estructura microbiana.	El uso simultáneo de fertilizantes y pesticidas amplifica los efectos negativos sobre el microbioma del suelo, provocando un deterioro acelerado de la calidad del suelo.

50	(van Rijssel et al., 2022)	Soil microbial diversity and community composition during conversion from conventional to organic agriculture	Estudio de campo longitudinal en suelos agrícolas de los Países Bajos (franco-arenosos), evaluando la transición de agricultura convencional a orgánica y sus efectos en comunidades microbianas.	<i>Firmicutes</i> , <i>Bacteroidetes</i> , <i>Basidiomycota</i> , <i>Actinobacteria</i> .	Positivo: se observó recuperación gradual de la diversidad microbiana y mejora de la estructura funcional del suelo.	La conversión hacia agricultura orgánica favorece la resiliencia del suelo y restablece la red microbiana tras décadas de exposición a pesticidas sintéticos.
51	(Vázquez et al., 2021)	Effects of glyphosate on soil fungal communities: A field study	Estudio de campo que evaluó los efectos del glifosato en suelos agrícolas de Argentina, con énfasis en comunidades fúngicas bajo aplicación continua.	Comunidades fúngicas del suelo: <i>Ascomycota</i> , <i>Basidiomycota</i> , hongos saprofiticos y micorrizicos.	Negativo: disminuyó la diversidad fúngica, con pérdida de especies beneficiosas y predominio de hongos tolerantes al herbicida.	El uso prolongado de glifosato altera la estructura y función de las comunidades fúngicas, afectando la salud del suelo y su capacidad de descomposición orgánica.
52	(Vickneswaran et al., 2023)	Establishing the extent of pesticide contamination in Irish agricultural soils	Estudio de campo en suelos agrícolas franco-limosos de Irlanda, analizando la presencia y persistencia de pesticidas residuales (principalmente herbicidas e insecticidas clorados).	<i>Proteobacteria</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Acidobacteria</i> , hongos saprofiticos.	Negativo: se detectaron residuos persistentes que redujeron la biomasa microbiana y la tasa respiratoria del suelo.	Los suelos europeos, aun bajo regulaciones modernas, presentan acumulaciones históricas de pesticidas que limitan la funcionalidad microbiana y los procesos biogeoquímicos.
53	(Virk et al., 2025)	Organic amendments restore soil biological properties under pesticides application	Estudio experimental de campo en suelos agrícolas asiáticos franco-arcillosos expuestos a pesticidas comunes (organofosforados e imidacloprid) y tratados con enmiendas orgánicas (compost y biochar).	<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Streptomyces</i> .	Positivo: las enmiendas orgánicas restauraron la biomasa microbiana y mejoraron la actividad enzimática afectada por los pesticidas.	La incorporación de materia orgánica actúa como mitigador ecológico frente a la toxicidad de pesticidas, reactivando el metabolismo microbiano y la fertilidad del suelo.

54	(Walder et al.,2022)	Soil microbiome signatures are associated with pesticide residues in arable landscapes	Estudio de campo multisitio en paisajes agrícolas arables europeos (Suiza y Alemania), analizando firmas microbianas asociadas con residuos de pesticidas (fungicidas, herbicidas e insecticidas).	<i>Firmicutes, Actinobacteria, Ascomycota, Basidiomycota.</i>	Negativo: se observó reducción en la diversidad microbiana y pérdida de especies clave en suelos con altas concentraciones de residuos.	Los residuos de pesticidas dejan una huella biológica persistente ("firma microbiana") en suelos agrícolas, reflejando alteraciones estructurales y funcionales duraderas del microbioma.
55	(Wang et al.,2020)	Adsorption, mobility, biotic and abiotic metabolism and degradation of pesticide exianliumi in three types of farmland	Estudio de campo prolongado en campos arrozeros inundados (China) comparando suelos con y sin exposición prolongada a pesticidas organofosforados y triazoles.	<i>Proteobacteria, Firmicutes, Chloroflexi, Cyanobacteria;</i> comunidades especializadas en ambientes anóxicos.	Negativo: los suelos expuestos mostraron menor diversidad funcional y cambios en la composición de subcomunidades microbianas.	En sistemas inundados, la exposición prolongada altera tanto la estructura del microbioma como los ciclos biogeoquímicos anaerobios, afectando la sostenibilidad de los arrozales.
56	(Wang et al.,2025)	Insights on persistent herbicides in cropland soils in northern China: Occurrence, ecological risks, and phytotoxicity to subsequent crops	Estudio de campo y laboratorio en suelos agrícolas del norte de China (franco-arcillosos) sobre herbicidas persistentes (principalmente triazinas y sulfonilureas). Analiza la fitotoxicidad y la residualidad química.	Comunidades bacterianas (<i>Pseudomonas, Bacillus, Nitrosospira</i>) y fúngicas (<i>Aspergillus, Penicillium</i>).	Negativo: los herbicidas mostraron alta persistencia y toxicidad para cultivos posteriores, con reducción de biomasa microbiana.	La acumulación de herbicidas persistentes altera la estructura microbiana y la funcionalidad del suelo, comprometiendo la sostenibilidad agrícola a largo plazo.
57	(Wang et al.,2025)	Microbial composition, assembly, and functional characteristics of generalized and specialized subcommunities under flooded paddy fields: long-term pesticide versus non-pesticide models	Ensayo de laboratorio controlado en tres tipos de suelo agrícola (arenoso, franco y arcilloso) sobre el pesticida Exianliumi (de reciente formulación, con comportamiento similar a sulfonilureas).	<i>Bacillus, Streptomyces, Rhizobium</i> y hongos degradadores (<i>Trichoderma</i>).	Mixto: el pesticida mostró degradación rápida en suelos franco-arcillosos con alta materia orgánica, pero persistencia elevada en arcillosos.	La interacción entre textura del suelo y actividad microbiana determina la tasa de degradación de pesticidas; los suelos más orgánicos son más resilientes.
58	(Wen et al.,2025)	Impact of long-term use of multiple herbicides on soil microbial communities and nutrient cycling across different agricultural land-use types	Estudio de campo a largo plazo en diversos usos agrícolas (cultivos rotativos y de hortalizas) con aplicación continua de múltiples herbicidas (glifosato, atrazina, metribuzina).	<i>Actinobacteria, Proteobacteria, Firmicutes, Nitrospirae.</i>	Negativo: disminución sostenida de la diversidad microbiana y alteración del ciclo del nitrógeno y fósforo.	El uso prolongado de herbicidas múltiples altera el equilibrio trófico del suelo y degrada los procesos de reciclaje de nutrientes esenciales.

59	(Wijntjes et al., 2022)	Decelerated degradation of a sulfonilurea herbicide in four fungicide-treated soils	Estudio de laboratorio en suelos agrícolas tratados con fungicidas (triazoles y estrobilurinas) y exposición posterior al herbicida sulfonilurea.	<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Trichoderma</i> .	Negativo: la degradación del herbicida se ralentizó significativamente en suelos previamente tratados con fungicidas, afectando la actividad microbiana.	Los fungicidas alteran las rutas metabólicas bacterianas implicadas en la degradación de herbicidas, generando sinergias tóxicas que prolongan la contaminación del suelo.
60	(you et al., 2020)	Biochar reduced Chinese chive (<i>Allium tuberosum</i>) uptake and dissipation of thiamethoxam in an agricultural soil	Estudio de campo en suelos agrícolas franco-arenosos del norte de China, sobre el insecticida neonicotinoide thiamethoxam y el efecto del biochar en su degradación y absorción por cebollín (<i>Allium tuberosum</i>).	<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Azotobacter</i> , hongos saprofíticos.	Positivo: el biochar redujo la biodisponibilidad del pesticida, mitigando la fitotoxicidad y favoreciendo la recuperación microbiana.	La aplicación de biochar es una estrategia efectiva para reducir la movilidad de neonicotinoides y restaurar la salud microbiana del suelo contaminado.
61	(Yu et al.,2023)	Pesticide interference and additional effects on plant microbiomes	Estudio y experimentación parcial sobre interferencias de pesticidas (herbicidas, fungicidas, insecticidas) en el microbioma asociado a plantas. Enfocado en suelos agrícolas y rizosfera.	<i>Rhizobium</i> , <i>Burkholderia</i> , <i>Trichoderma</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> .	Negativo: los pesticidas alteran la simbiosis planta–microorganismo, reduciendo funciones protectoras y metabólicas.	La alteración del microbioma de la rizosfera afecta la nutrición vegetal y la resiliencia frente a enfermedades, generando dependencia química progresiva.
62	(Zhang et al., 2022)	The profiles of chiral pesticides in peri-urban areas near Yangtze River: Enantioselective distribution characteristics and correlations with surface sediments	Estudio de campo controlado en campos de trigo (suelos arcillosos y franco-limosos) bajo aplicación de fungicidas triazoles (propiconazol, tebuconazol).	<i>Proteobacteria</i> , <i>Firmicutes</i> , <i>Basidiomycota</i> , <i>Ascomycota</i> .	Negativo: disminuyó la diversidad microbiana y la estabilidad de la red trófica del suelo, especialmente en cultivos resistentes a enfermedades.	Los fungicidas, aun en cultivos resistentes, afectan la estabilidad funcional del microbioma, alterando procesos enzimáticos y la capacidad del suelo para autorregularse.
63	(Zhang et al., 2023)	Nonenantioselective environmental behavior of a chiral antiviral pesticide dufulin in aerobic soils	Estudio ambiental de campo en zonas periurbanas del río Yangtsé (China), analizando pesticidas quirales (organofosforados y piretroides) en suelo y sedimentos.	<i>Actinobacteria</i> , <i>Proteobacteria</i> , comunidades degradadoras de xenobióticos.	Negativo: los pesticidas quirales mostraron distribución enantioselectiva y persistencia en suelos y sedimentos, afectando microorganismos degradadores.	La asimetría química de los pesticidas quirales implica riesgos diferenciados: ciertos enantiómeros pueden ser más tóxicos y resistentes a la biodegradación.

64	(Zhang et al., 2024)	Fungicides reduce soil microbial diversity, network stability and complexity in wheat fields with different disease resistance	Estudio de laboratorio sobre el comportamiento ambiental de dufulin, un pesticida antiviral quiral, en suelos agrícolas aeróbicos. Se evaluó su persistencia y comportamiento no enantioselectivo.	<i>Bacillus</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Proteobacteria</i> .	Mixto: la degradación fue similar para ambos enantiómeros, pero se observó acumulación prolongada del compuesto en suelos arcillosos.	Los pesticidas quirales pueden mantener persistencia sin distinción de isómero, generando contaminación duradera y afectando microorganismos degradadores.
65	(Zheng et al., 2025)	Alterations in microbial community structures and metabolic function in soil treated with biological and chemical insecticides	Estudio experimental de campo y laboratorio en suelos agrícolas franco-arenosos, analizando insecticidas biológicos (basados en hongos entomopatógenos) y químicos (organofosforados).	<i>Beauveria bassiana</i> , <i>Metarhizium anisopliae</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> .	Mixto: los insecticidas biológicos preservaron la diversidad microbiana, mientras que los químicos redujeron actividad enzimática y biomasa.	El uso combinado de insecticidas biológicos y químicos puede optimizar el control de plagas minimizando el impacto ecológico, si se regula la dosis química.
66	(Zhou et al., 2025)	A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage	Estudio científico global sobre los impactos ambientales y en salud humana del uso prolongado de pesticidas sintéticos (organoclorados, neonicotinoides, triazoles, glifosato).	Revisión de múltiples grupos: <i>Firmicutes</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Fungi</i> simbióticos.	Negativo: documenta bioacumulación, alteraciones microbianas y efectos tóxicos persistentes.	El uso extensivo de pesticidas químicos genera una doble amenaza ambiental y sanitaria, afectando tanto microbiomas del suelo como la cadena alimentaria.
67	(Zuo et al., 2024)	Current-use pesticides monitoring and ecological risk assessment in vegetable soils at the provincial scale	Estudio de monitoreo a escala provincial (China) sobre pesticidas actuales en suelos de hortalizas (glifosato, atrazina, clorpirifos, carbendazim). Tipo de suelo: franco-limoso agrícola.	Comunidades bacterianas (<i>Proteobacteria</i> , <i>Nitrospirae</i> , <i>Firmicutes</i>) y hongos del suelo.	Negativo: detectaron concentraciones residuales por encima de niveles de seguridad y alteraciones en indicadores microbianos de la salud del suelo.	La acumulación multicomponente de pesticidas refleja riesgos ecológicos acumulativos, deteriorando los ciclos de nitrógeno y carbono del suelo agrícola.

Fuente: elaboración propia (2025)

3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

En la presente revisión se evaluaron en los diferentes estudios como la interacción de pesticidas y el ecosistema del suelo, adsorción-desorción de pesticidas, interacción de pesticidas sobre la microbiota del suelo, alteraciones enzimáticas y finalmente aborda estrategias de conservación de la actividad biológica del suelo ante el uso de pesticidas.

3.1.1. Interacciones entre pesticidas y el ecosistema del suelo

La interacción entre pesticidas y el ecosistema del suelo representa una característica esencial que ayuda a comprender cómo impactan ecológicamente los pesticidas en las actividades agrícolas. El suelo funciona como un sistema biológico activo, donde los microorganismos desempeñan funciones esenciales para la actividad y vida del suelo, no solo descomponen, sino que transforman y degradan los compuestos químicos, aplicados sobre él, como son los pesticidas (Benoit et al., 2023; Dhuldhaj et al., 2023).

Sin embargo, cabe aclarar que estos compuestos tienen una complejidad química sobre el suelo, y las funciones, condiciones y vitalidad se pueden ver afectadas y modificadas, afectando la dinámica microbiana, actividad enzimática y procesos bioquímicos que regulan la fertilidad del suelo, alterando la estabilidad del ecosistema de él (Benoit et al., 2023). La inclusión de este tema en la revisión sistemática nos permite analizar cómo estas interacciones entre pesticida y el ecosistema del suelo limitan la capacidad de la autorregulación del suelo.

Diferentes estudios han evidenciado que la interacción pesticida y suelo incluye varias variables químicas, biológicas y ecológicas, que determinan los efectos de los compuestos en el ecosistema del suelo (Wang et al., 2020; Streletskii et al., 2023; Riedo et al., 2025). Según el estudio de Li et al. (2025), la exposición de herbicidas como el glifosato y los fertilizantes nitrogenados como son la urea, generan un desequilibrio y desbalance considerable en los ciclos del suelo, como son el ciclo de nitrógeno, lo cual afecta directamente la actividad enzimática (nitrato, reductasa y ureasa) que son esenciales para modificación y disponibilidad de compuestos nitrogenados. Este tipo de interacción química aumenta la presión metabólica de las bacterias nitrificantes y amonificantes.

Adicionalmente, el estudio de Wang y colaboradores (2025) evidenció que los herbicidas persistentes aplicados en cultivos causan alteraciones en la microbiota del suelo, provocando degradaciones parciales que dejan residuos de pesticidas, fitotóxicos, y que afectan la dinámica microbiana en nuevos cultivos. Los autores evidenciaron que, incluso tras varios ciclos agrícolas, la capacidad del suelo para recuperar su actividad biológica natural sigue comprometida, mostrando una reducción en la abundancia de géneros microbianos involucrados en los procesos de oxidación del carbono.

De forma complementaria, Drocco et al. (2025) analizaron los efectos combinados de pesticidas y perturbaciones ambientales sobre los microorganismos relacionados con el ciclo del nitrógeno, encontrando que las comunidades bacterianas presentan una fuerte sensibilidad funcional, expresada en la inhibición de las rutas de nitrificación y desnitrificación. Este fenómeno indica que la exposición a mezclas de pesticidas puede interferir directamente en la red metabólica del suelo, afectando no solo la estructura de la comunidad, sino también la estabilidad funcional de los ecosistemas agrícolas.

En el estudio de Peprah et al. (2025) se observó que en los suelos agrícolas la aplicación constante y continua de pesticidas altera de manera significativa la estructura del suelo, lo cual provoca la reducción de la diversidad alfa, promoviendo el crecimiento y estancia de especies resistentes, con una capacidad baja de biodegradación. Dichas transformaciones provocan un cambio en la interacción simbiótica entre microorganismos y raíces, limitando la asimilación de nutrientes por las plantas y disminuyendo la productividad agrícola.

No obstante, los autores Shahid et al. (2023) señalan que los consorcios microbianos que son tolerantes a pesticidas sean usados como ayuda biotecnológica, para disminuir estos efectos, cabe resaltar que la exposición prolongada a estos pesticidas químicos puede causar un factor selectivo, favoreciendo microorganismos metabólicamente adaptados, en consecuencia, generando una pérdida de biodiversidad y funcionalidad del ecosistema del suelo.

La actividad ecológica del suelo frente a este tipo de contaminantes según los estudios de Sarker et al. (2024) y Chaudhary et al. (2024), depende de su estructura bioquímica, y la influencia mutua entre microorganismos degradadores y compuestos orgánicos. Existen además, diferentes factores que componen el suelo, como cationes metálicos, iones diversos y compuestos orgánicos, que influyen significativamente en la actividad de microorganismos y enzimas del suelo. Enfatizando que los procesos abióticos y actividad microbiana influyen principalmente en la actividad final de los pesticidas, ya que estos establecen la transformación y acumulación.

En el suelo, la degradación eficiente de los pesticidas ocurre cuando los organismos son capaces no solo de tener la capacidad metabólica para transformarlos o degradarlos sino de tener la capacidad y los factores para sobrevivir en un ambiente contaminado por estos, por ejemplo, las condiciones climáticas (temperatura, lluvia y humedad), las reacciones químicas y fisicoquímicas (solubilidad, estructura química), llevadas a cabo en este ecosistema, características del suelo (pH, contenido de materia orgánica, textura), (Stupar et al., 2024). La abundancia y diversidad de microorganismos degradadores (Sim et al., 2022). La tabla 4 muestra los principales grupos de pesticidas, los mecanismos de sus acciones, así como los microorganismos con capacidad de biodegradación y sus interacciones.

Sin embargo, cuando este equilibrio se ve afectado, la biodegradación se vuelve ineficiente, lo que causa que la persistencia de pesticidas sea por un tiempo prolongado, afectando la fertilidad y sostenibilidad del suelo. La comunidad microbiana del suelo se ve vulnerable ante estos compuestos, ya que los microorganismos cumplen un rol esencial en el sostenimiento de los procesos ecosistémicos.

En particular, los pesticidas organoclorados y organofosforados continúan siendo problemáticos por su persistencia prolongada y su lenta biodegradación. Estos compuestos tienden a adsorberse fuertemente a la materia orgánica y fracciones inorgánicas del suelo, lo que puede generar efectos citotóxicos en la microbiota del suelo (Chia et al., 2024; Yasir et al., 2025).

Como ya lo plantearon Sharma et al. (2023), el uso excesivo de pesticidas en la agricultura actual genera serias inquietudes respecto a su incidencia ambiental, especialmente en lo que concierne a la calidad del suelo. Los pesticidas deben tener una solubilidad adecuada, persistencia reducida y una biodisponibilidad elevada, de manera que su degradación ocurra de manera rápida. Sin embargo, para que este proceso sea efectivo, es indispensable que estén presentes ciertos factores que complementan la estructura del suelo e indican una buena calidad de este. Sin estas condiciones los pesticidas no logran degradarse y se acumulan en el suelo por un tiempo prolongado (Li et al 2025 Balázs et al.,2020).

Tabla 4. Interacción de los pesticidas sobre la funcionalidad y microbiota del suelo

Grupo de pesticida	Efectos de pesticidas sobre el suelo	Interacción de microbiota	Evidencia de estudio
Organoclorados (OCPs) — DDT, HCH, endosulfán	Tiene una alta persistencia y bioacumulación; semivolátiles; fuerte asociación a materia orgánica del suelo y sedimentos; lixiviación son lenta pero larga vida media; metabolitos tóxicos	Provocan pérdida significativa de la diversidad bacteriana y fúngica, inhiben la colonización de microorganismos degradadores y favorecen cepas resistentes	Según Egbe et al. (2021), estos compuestos alteran de forma severa la estructura de las comunidades bacterianas y fúngicas del suelo, reduciendo su resiliencia. Balázs et al. (2020) encontraron que, incluso tras décadas de descontaminación, las comunidades microbianas no recuperan su composición original, evidenciando un impacto prolongado.

<p>Organofosforados (OPs) — clorpirifos, paratión, diazinón</p>	<p>No tan persistentes como OCPs, pero su toxicidad es aguda alta; degradan más rápido en condiciones húmedas; pueden alterar procesos del ciclo de nitrógeno cuando hay constante exposición de pesticidas</p>	<p>Alteran la comunidad bacteriana, reducen la actividad de fosfatasas y deshidrogenasas, y generan cambios en el equilibrio de bacterias</p>	<p>Sim et al. (2022) demostraron que estos pesticidas afectan directamente las funciones microbianas relacionadas con el ciclo del nitrógeno, alterando la actividad de enzimas claves. En una evaluación complementaria, Sim et al. (2023) reportaron que exposiciones repetidas reducen la funcionalidad metabólica bacteriana.</p>
<p>Fungicidas triazoles — difenoconazole, flutriafol, imazalil, penflufen</p>	<p>Su Persistencia moderada-alta; efectos sinérgicos/antagonistas en mezclas; pueden reducir o retener la degradación de otros compuestos (interferencia cruzada)</p>	<p>Inhiben hongos saprófitos y alteran la relación fúngico-bacteriana del suelo, reduciendo la complejidad de las redes tróficas microbianas.</p>	<p>De acuerdo con Mäder et al. (2024), el difenoconazole interfiere en la degradación del glifosato y modifica la diversidad bacteriana. Han et al. (2023) observaron que los fungicidas imazalil y penflufen reducen la complejidad de las redes microbianas. Además, Zhang et al. (2024) demostraron que estos compuestos disminuyen la estabilidad y conectividad de las comunidades fúngicas.</p>
<p>Neonicotinoides — imidacloprid, thiamethoxam</p>	<p>Persistencia moderada; móviles en algunos suelos; efectos en raíces y rizosfera; potencial acumulación en tejidos vegetales</p>	<p>Afectan bacterias fijadoras de nitrógeno y actinomicetos; alteran las poblaciones rizosféricas asociadas a las raíces.</p>	<p>Según You et al. (2020), la aplicación de thiamethoxam altera la microbiota asociada a raíces y disminuye la actividad de bacterias nitrificantes, aunque la enmienda con biochar reduce parcialmente estos efectos.</p>
<p>Herbicidas sulfonilureas — (ej. metsulfuron, sulfosulfuron)</p>	<p>Es muy activos a bajas dosis; persistencia variable; interacciones de mezcla que reducen la degradación de otros compuestos</p>	<p>Reducen la actividad de microorganismos nitrificantes y descomponedores; alteran la dinámica de las bacterias del género <i>Pseudomonas</i></p>	<p>Wijntjes et al. (2022) documentaron que los suelos tratados con fungicidas presentan una degradación significativamente más lenta de sulfonilureas, lo que sugiere una sinergia negativa en los procesos de detoxificación microbiana.</p>

Glifosato (y coformulantes)	Tiene una baja bioacumulación, pero sus efectos formulantes, coformulantes que lo conforman y el uso intensivo aumentan su toxicidad. Favorece microorganismos resistentes	No todos los microorganismos se ven igualmente afectados; algunos géneros degradadores (Bacillus, Pseudomonas) toleran el compuesto, mientras que otros disminuyen su abundancia	Según Gandhi et al. (2021), los coformulantes del glifosato son los principales responsables de la toxicidad sobre microorganismos del suelo. Li et al. (2025) hallaron que la exposición conjunta con urea altera la dinámica del nitrógeno. Asimismo, Mäder et al. (2024) indicaron que las mezclas con fungicidas reducen su degradación, intensificando el impacto sobre la microbiota.
Carbamatos — carbaryl, carbofurán	Es de menor persistencia que OCPs/OPs; más susceptibles a biodegradación; su toxicidad enzimática clara, pero de menor duración	Inhiben enzimas microbianas (ureasa, catalasa) y reducen temporalmente la actividad respiratoria del suelo	Dhuldhaj et al. (2023) reportaron que los carbamatos provocan una disminución temporal en la biomasa microbiana y en la actividad de deshidrogenasas, mientras que Bokade et al. (2023) confirmaron la capacidad de bacterias como Pseudomonas sp. para degradar estos compuestos y restablecer la funcionalidad del suelo.
Piretroides — cipermetrina, permetrina	Es baja a moderada persistencia; más hidrofóbicos; se adsorben a la materia orgánica, tiene un efecto agudo más que crónico en suelo	Afectan hongos y actinomicetos del suelo, alterando la composición superficial	De acuerdo con Zhang et al. (2024), los piretroides reducen transitoriamente la diversidad fúngica, pero el sistema se recupera en pocas semanas. Dhuldhaj et al. (2023) también observaron efectos moderados en la abundancia bacteriana, con recuperación rápida de la actividad enzimática.

Fuente: elaboración propia, investigado en (You et al., 2020); (Balázs et al., 2020); (Egbe et al., 2021); (Gandhi et al., 2021); (Sim et al., 2022); (Wijntjes et al., 2022); (Han et al., 2023); (Dhuldhaj et al., 2023); (Bokade et al., 2023); (Sim et al., 2023); (Mäder et al., 2024); (Zhang et al., 2024); (Li et al., 2025)

Diferentes estudios nos demuestran que la persistencia de los pesticidas altera las comunidades microbianas, afectando así la disponibilidad de nutrientes, actividad enzimática y ciclos biogeoquímicos, lo cual induce procesos de factores de selección microbiológica, y solo prevalecerán microorganismos resistentes, demostrando así la estructura microbiana y funcionalidad de suelo se verán afectados, comprometiendo la fertilidad y autorregulación de este. Por eso es importante reconocer la complejidad de estos efectos para desarrollar estrategias para conservar la microbiota del suelo y la productividad y salud ecológica.

3.1.2. Pesticidas en el suelo

La identificación de distintas moléculas de contaminantes y sus productos de degradación en los suelos ha sido un reto. Dado que los suelos son matrices complejas y los pesticidas tienen estructuras químicas diversas, se han desarrollado

y evaluado diferentes métodos de extracción para poder vigilar y cuantificar los residuos de estos compuestos en el suelo.

Adsorción-desorción son mecanismos físicos y químicos, que permiten a los pesticidas incorporarse y fijarse en el ecosistema del suelo, controlando su movilidad, persistencia y la biodisponibilidad para degradarse, además, determinan procesos asociados a la interacción con la microbiota del suelo. La inclusión de este tema en la revisión sistemática responde a la necesidad de analizar cómo estos procesos fisicoquímicos condicionan la biodisponibilidad de los pesticidas y, en consecuencia, su influencia en la estabilidad microbiana y en la funcionalidad del ecosistema del suelo.

En este sentido, el estudio de Khalid et al. (2020) demuestra cómo la funcionalidad de los pesticidas está conducida por estos dos procesos de adsorción-desorción, determinando la interacción de los pesticidas hacia cuerpos de agua, superficies terrestres y subterráneas, concluyendo que depende de las propiedades fisicoquímicas del suelo y del contaminante, el rumbo final de estos compuestos en diferentes ecosistemas del suelo.

Según Tripathi et al. (2020), los fertilizantes y pesticidas sintéticos interactúan con las cargas superficiales de las partículas minerales del suelo, modificando su pH y capacidad de intercambio catiónico, lo cual afecta directamente la adsorción y, por tanto, la biodisponibilidad para la microbiota. Este fenómeno condiciona los procesos de degradación enzimática, ya que los microorganismos dependen del contacto directo con las moléculas del contaminante para iniciar la biotransformación.

De acuerdo con Gandhi et al. (2021), los coformulantes presentes en herbicidas como el glifosato pueden alterar la dinámica de adsorción al modificar las propiedades hidrofóbicas del suelo, incrementando la solubilidad del compuesto y su movilidad hacia las capas más profundas. A largo plazo, Rinaldy & Pahira (2025) demostraron que el uso continuado de pesticidas genera una saturación de los sitios activos de adsorción, disminuyendo la capacidad del suelo para retener nuevas moléculas. Este fenómeno, denominado “fatiga de adsorción”, propicia la lixiviación hacia cuerpos de agua y la contaminación de acuíferos, además de reducir la densidad microbiana y la estabilidad enzimática del suelo.

De manera complementaria, Jat et al. (2022) señalaron que los procesos de adsorción condicionan los servicios ecosistémicos del suelo, ya que al limitar la disponibilidad de contaminantes también restringen la actividad de las bacterias y hongos responsables de su biodegradación, afectando el equilibrio biogeoquímico.

La interacción entre las propiedades estructurales del pesticida, la textura del suelo y la composición de la microbiota define la magnitud de los efectos ecológicos. Los suelos con mayor contenido de arcilla y materia orgánica suelen retener una fracción importante del contaminante, reduciendo su toxicidad inmediata, pero aumentando

su persistencia, mientras que aquellos con baja capacidad de adsorción presentan mayor riesgo de lixiviación y exposición microbiana directa.

En este sentido, Sandeep et al. (2024) identificaron que las propiedades texturales del suelo determinan la capacidad de adsorción de pesticidas y, en consecuencia, su biodisponibilidad para la microbiota. Los suelos arenosos presentan una baja retención y mayor riesgo de lixiviación, lo que incrementa la exposición microbiana directa. En contraste, los suelos arcillosos y con alto contenido de materia orgánica actúan como amortiguadores, reduciendo la toxicidad, pero prolongando la persistencia química. En la Tabla 5 se resumen estas relaciones entre textura, adsorción y efectos biológicos.

Tabla 5. Relación entre la textura del suelo y la adsorción de pesticidas

Tipo de suelo (características)	Capacidad de adsorción de pesticidas	Movilidad o riesgo ambiental	Evidencia de estudio
Arenoso (textura gruesa, <10% de arcilla, baja materia orgánica)	Muy baja: los pesticidas permanecen solubles y con alta movilidad.	Alto riesgo de lixiviación hacia aguas subterráneas y alta exposición microbiana.	Según Singh et al. (2021), los suelos arenosos tienen baja capacidad de adsorción y elevada movilidad de pesticidas, lo que incrementa el riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Sandeep et al. (2024) confirman que la alta permeabilidad del suelo arenoso reduce la retención y favorece el transporte de compuestos solubles.
Franco (textura media, 10–30% de arcilla, equilibrio entre arena y limo)	Moderada: equilibrio entre retención y biodisponibilidad.	Movilidad intermedia; permite degradación sin acumulación excesiva.	Según López et al. (2022), los suelos francos mantienen un equilibrio entre adsorción y biodisponibilidad, lo que facilita la degradación microbiana eficiente. De manera similar, Zheng et al. (2025) encontraron que los suelos con mezcla balanceada de fracciones finas y gruesas presentan adsorción moderada y baja persistencia, garantizando menor riesgo ambiental.

Arcilloso (textura fina, >30% de arcilla, alta superficie específica y carga negativa)	Alta: gran retención por superficie y carga negativa.	Bajo riesgo de lixiviación, pero posible acumulación de residuos persistentes.	Según el estudio de Sandeep et al. (2024), los suelos arcillosos presentan una alta capacidad de adsorción por su carga negativa y estructura laminar, reduciendo la lixiviación de pesticidas. No obstante, Sharma y Gupta (2023) y Bravo et al. (2021) advierten que esta fuerte retención puede limitar la biodisponibilidad microbiana y provocar la persistencia de residuos tóxicos en el tiempo.
Orgánico (rico en humus o compost, alto contenido de carbono orgánico)	Muy alta, especialmente para compuestos lipofílicos.	Muy baja movilidad; los compuestos quedan fuertemente retenidos.	Según Pérez et al. (2020), los suelos con alto contenido de materia orgánica adsorben fuertemente los pesticidas lipofílicos, reduciendo su toxicidad aguda sobre microorganismos. De igual modo, Zhang et al. (2023) señalan que la composición del carbono orgánico y el pH son determinantes en la capacidad de retención de pesticidas, actuando como un filtro protector del ecosistema del suelo

Fuente: elaboración propia, investigado en (Sandeep et al.,2024); (Singh et al.,2021); (López et al.,2022); (Sharma y Gupta 2023); (Bravo et al.,2021); (Pérez et al.,2020); (Zhang et al.,2023); y (Zheng et al.,2025)

Por lo tanto, lo anterior, la adsorción es uno de los procesos importantes que determinan la interacción de los pesticidas con el suelo. Este mecanismo influye directamente en los compuestos iniciales que se transforman en metabolitos de manera más rápida, así como en su movilidad. A través de la adsorción, los pesticidas pueden reducir su degradación microbiana o, por el contrario, favorecer la degradación no biológica al acelerar reacciones como la hidrólisis. La desorción depende principalmente de las características fisicoquímicas de los constituyentes del suelo y de la fuerza con la que se establecen las interacciones entre estos y el pesticida (Punniyakotti et al.,2024).

En conclusión, la adsorción y desorción de pesticidas en el suelo son procesos dinámicos que integran factores fisicoquímicos y biológicos, y cuya comprensión resulta esencial para predecir el comportamiento ambiental de estos compuestos. Desde una perspectiva microbiológica, ambos mecanismos determinan la

exposición, la toxicidad y la capacidad de recuperación del suelo frente a la contaminación química, siendo claves para el diseño de estrategias de manejo sustentables orientadas a preservar la actividad biológica y la salud del ecosistema.

3.1.3. Interacción de pesticidas sobre la microbiota del suelo

El ecosistema del suelo representa una complejidad biológica en donde interactúan múltiples factores físicos, químicos y biológicos que aseguran un equilibrio y productividad agrícola. La microbiota del suelo cumple un rol especial al involucrarse en la descomposición de materia orgánica, el ciclo de nutrientes y la estructura del suelo. Aunque la aplicación continua de pesticidas persistentes ha alterado de manera significativa todas estas etapas del suelo, generando factores que modifican su estructura e interacción entre comunidades microbianas (Egbe et al., 2021).

Los pesticidas que ya se encuentran en el ecosistema del suelo se modifican determinando así su movilidad, adsorción y la persistencia, cabe aclarar que también influyen factores ambientales como es la estructura del suelo, humedad, pH, entre otras características biológicas, lo cual influye directamente en la biodisponibilidad, y el impacto sobre la microbiota del suelo (You et al., 2020).

Se ha evidenciado que en suelos con menor actividad microbiana la degradación de los compuestos es más lenta, lo cual prolonga su permanencia y acentúa los efectos tóxicos sobre bacterias, hongos y arqueas del suelo. Como consecuencia, se reduce la biomasa total y se afecta la abundancia de grupos microbianos que cumplen funciones críticas en los ciclos biogeoquímicos, como *Azotobacter*, *Rhizobium* y hongos micorrícicos (McGinley et al., 2023).

A nivel funcional, los pesticidas pueden interferir con las rutas metabólicas responsables de la síntesis de enzimas clave para el equilibrio del suelo. Otros estudios han demostrado que los herbicidas, al interactuar con la microbiota, reducen la abundancia de genes asociados a los procesos de nitrificación y desnitrificación, afectando la fijación y disponibilidad de nitrógeno (Zheng et al., 2025).

Además de estos efectos metabólicos, los pesticidas provocan estrés oxidativo, alteraciones estructurales y daños en las membranas celulares de los microorganismos. Se ha observado que la exposición a insecticidas neonicotinoides y fungicidas triazólicos genera la acumulación de especies reactivas de oxígeno que afectan la integridad celular y limitan la viabilidad microbiana (Wijntjes et al., 2022; Egbe et al., 2021). Estas alteraciones repercuten en la capacidad del suelo para sostener procesos vitales como la degradación de compuestos orgánicos y el mantenimiento de la actividad enzimática.

La relación entre pesticidas y microorganismos degradadores, como son *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Sphingomonas*, es esencial para la dinámica del suelo, ya que tienen la capacidad de degradar estos compuestos contaminantes por medio

de rutas metabólicas. Sin embargo, al estar el suelo expuesto por un tiempo prolongado, puede generar mutaciones o pérdida de los genes catabólicos (Egbe et al., 2021).

Tabla 6. Microorganismos afectados por la exposición de pesticidas

Grupo microbiano	Función ecológica principal	Pesticidas más asociados	Interacción pesticida con microorganismo	Evidencia de estudio
Bacterias del género <i>Pseudomonas</i>	Degradación de compuestos orgánicos y fijación de nitrógeno	Organofosforados, Glifosato	Reducción de abundancia y pérdida de capacidad degradadora; algunas cepas desarrollan resistencia adaptativa	Según el estudio de Maharana et al. (2025) y Dhuldhaj et al. (2023), la exposición prolongada a pesticidas altera la estructura genética y funcional de <i>Pseudomonas</i> , afectando su papel en la biorremediación.
Bacterias del género <i>Bacillus</i>	Descomposición de materia orgánica y producción de enzimas del suelo	Herbicidas persistentes, Carbamatos	Disminución de la actividad enzimática (ureasa, fosfatasa) y de la biomasa bacteriana	Según el estudio de Astaykina et al. (2020) y Serbent et al. (2021), los pesticidas reducen la abundancia de <i>Bacillus</i> , afectando procesos de mineralización.
Actinomicetos (p. ej. <i>Streptomyces</i>)	Participan en el ciclo del carbono y producción de antibióticos naturales	Clorpirifos, Atrazina	Reducción en la población y en la formación de filamentos; menor capacidad de degradar lignina y celulosa	Según Dhuldhaj et al. (2023) y Vázquez et al. (2021), la exposición a pesticidas persistentes provoca cambios morfológicos y pérdida de diversidad en actinomicetos.

Hongos micorrícicos arbusculares	Simbiosis con raíces, absorción de fósforo y agua	Glifosato, Triazoles	Disminución en colonización micorrícica y pérdida de biomasa fúngica	De acuerdo con Vázquez et al. (2021) y Ruuskanen et al. (2023), los herbicidas afectan la simbiosis planta–hongo, reduciendo la eficiencia en la absorción de nutrientes.
Bacterias nitrificantes (<i>Nitrosomonas</i> , <i>Nitrobacter</i>)	Conversión de amonio a nitrato en el ciclo del nitrógeno	Glifosato, Imidacloprid	Inhibición de enzimas nitrificantes (<i>amoA</i> , <i>nifH</i>) y reducción de nitrificación	Según el estudio de Maharana et al. (2025), los pesticidas persistentes inhiben genes relacionados con el metabolismo del nitrógeno, reduciendo la disponibilidad de nutrientes.
Hongos saprófitos (<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i>)	Degradación de materia orgánica compleja	Herbicidas persistentes	Cambios en la abundancia relativa y pérdida de diversidad fúngica	De acuerdo con Astaykina et al. (2020) y Vázquez et al. (2021), la aplicación prolongada de herbicidas reduce la riqueza de hongos descomponedores.
Cianobacterias y algas del suelo	Fijación de nitrógeno y producción primaria	Pesticidas organoclorados	Inhibición de la fotosíntesis y disminución de la productividad biológica	Según Ruuskanen et al. (2023) y Dhuldhaj et al. (2023), los pesticidas persistentes afectan los microorganismos fotosintéticos del suelo, reduciendo su capacidad fijadora de nitrógeno.

Fuente: elaboración propia, investigado en (Vázquez et al.,2021); (Astaykina et al.,2020); (Serbent et al.,2021); (Ruuskanen et al.,2023); (Dhuldhaj et al.,2023); y (Maharana et al.,2025).

El desarrollo de técnicas moleculares avanzadas, como la metagenómica y la secuenciación masiva, ha permitido comprender con mayor detalle las modificaciones estructurales y funcionales que sufren las comunidades microbianas tras la exposición a pesticidas. Estas herramientas han revelado una reducción en

la diversidad genética asociada a la degradación de xenobióticos y un incremento en genes relacionados con resistencia a antibióticos y metales pesados, lo que refleja una adaptación microbiana ante ambientes contaminados (Zhou et al., 2025; You et al., 2020). Tal fenómeno puede considerarse una forma de coevolución inducida por la presión química del entorno.

Por otro lado, se han descrito mecanismos adaptativos como la co-metabolización, mediante los cuales los microorganismos transforman los pesticidas incidentalmente durante la degradación de otros sustratos, proceso que, aunque contribuye a su eliminación parcial, puede generar metabolitos más persistentes y tóxicos (Virk et al., 2025).

Diversos estudios de campo han evidenciado que la exposición crónica a pesticidas persistentes causa daños acumulativos que son difíciles de revertir por la alteración de las comunidades microbianas. Por ejemplo, Egbe et al. (2021) documentaron que suelos sometidos por más de diez años a insecticidas organoclorados perdieron más del 40 % de su diversidad microbiana total y más del 50 % de su biomasa fúngica activa. Más allá de sus efectos bactericidas y fungicidas, esta disminución de la actividad biológica se traduce en una menor capacidad de retención de nutrientes, alteraciones en la estructura del suelo y aumento en la emisión de gases de efecto invernadero como el óxido nitroso (Virk et al., 2025).

Ruuskanen et al. (2023) evidenciaron que los herbicidas alteran la estructura de la microbiota del suelo al suprimir especies beneficiosas y favorecer la proliferación de microorganismos resistentes, generando un desequilibrio ecológico que compromete la funcionalidad enzimática. Estos hallazgos subrayan que el impacto de los pesticidas sobre la microbiota no se limita a la reducción de la biomasa microbiana, sino que implica cambios en las redes tróficas, la expresión génica y la estabilidad metabólica del ecosistema del suelo.

Los pesticidas pueden modificar la microbiota del suelo tanto de manera favorable como perjudicial, dependiendo del compuesto químico del pesticida aplicado y de la comunidad microbiana del suelo presente. Algunos pesticidas actúan sobre enzimas que están relacionadas con la fotosíntesis de malezas, también impactan en plantas no deseadas y en microorganismos que componen el suelo. De forma similar, algunos fungicidas diseñados para eliminar especies específicas pueden dañar hongos no objetivo y alterar otros grupos microbianos.

El efecto de los pesticidas se extiende a las relaciones simbióticas entre plantas y microorganismos. La reducción de bacterias rizosféricas promotoras del crecimiento y de hongos micorrícicos disminuye la absorción de nutrientes, afectando la productividad de los cultivos y la estabilidad del suelo (McGinley et al., 2023). De igual modo, la contaminación del suelo por lixiviación o escorrentía transporta residuos hacia ecosistemas acuáticos, donde estos compuestos continúan ejerciendo presión ecológica sobre comunidades microbianas y organismos superiores (Wijntjes et al., 2022).

Además, el uso de pesticidas influye en el reciclado de nutrientes como el carbono y nitrógeno. Por ejemplo, el ciclo del carbono puede afectar los procesos de formación de la materia orgánica en el suelo. Según Zhang et al. (2024), la acumulación de estos compuestos está estrechamente vinculada con el contenido de materia orgánica, ya que esta regula la capacidad de adsorción y persistencia de los pesticidas. Cabe aclarar que la magnitud de estos efectos varía según las características del suelo, el tipo de pesticida aplicado y la dosis empleada sobre el suelo (Sim et al.,2020).

En el estudio realizado por Li et al. (2025), se evaluaron los efectos de la aplicación conjunta de glifosato herbicida organofosforado y urea fertilizante nitrogenada sobre el ciclo del nitrógeno en los suelos agrícolas. Para esto, se incubaron muestras de suelo no expuesto previamente a pesticidas durante 98 días, aplicando tratamientos con glifosato, urea y la combinación de ambos en distintas concentraciones.

Los resultados mostraron que la mezcla de glifosato y urea redujo las concentraciones de amonio y nitrato, además de disminuir la diversidad bacteriana y alterar genes clave del ciclo del nitrógeno, se redujo *nifH* (fijación biológica) y aumentaron *amoA* y *nosZ* (nitrificación y desnitrificación). Esto sugiere una transformación acelerada del nitrógeno hacia formas menos disponibles, disminuyendo su aprovechamiento por el suelo y las plantas.

En conjunto, el estudio evidencia que la aplicación simultánea de herbicidas y fertilizantes modifica la dinámica microbiana y la fertilidad del suelo, reduciendo la eficiencia del uso del nitrógeno y afectando la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Li et al.,2025).

También es importante considerar los efectos que puede tener la aplicación conjunta de distintos pesticidas. Cuando estos entran en contacto con la microbiota del suelo, se transforman mediante procesos bioquímicos y fisicoquímicos que generan metabolitos. Algunos pueden ser inofensivos, pero otros pueden resultar tóxicos.

El estudio de Mäder et al. (2024) analizó precisamente este tipo de interacciones al evaluar cómo la aplicación simultánea de varios pesticidas afecta la degradación del herbicida glifosato y la formación de su principal metabolito, el AMPA. Se observó que la presencia de MCPA y difenoconazol redujo la eficiencia de degradación del glifosato y modificó la actividad microbiana del suelo, disminuyendo los genes relacionados con su descomposición. En conjunto, estos resultados muestran que las mezclas de pesticidas pueden alterar los procesos microbianos y limitar la capacidad natural del suelo para degradar contaminantes.

Lo anterior sugiere que las interacciones entre pesticidas no solo modifican la dinámica microbiana, sino también la persistencia de metabolitos en el ecosistema del suelo. Los resultados demuestran que la mezcla de pesticidas puede generar

efectos no previstos sobre los procesos bioquímicos del suelo, aumentando la incertidumbre sobre la acumulación de metabolitos y sus impactos en la microbiota del suelo.

Zhou et al. (2025) mostraron que la exposición prolongada a mezclas de compuestos organofosforados y piretroides disminuía significativamente la actividad respiratoria microbiana y la disponibilidad de carbono orgánico activo. Estos resultados evidencian que los pesticidas en general no solo actúan como contaminantes, sino que modifican de forma directa las propiedades fisicoquímicas esenciales para la salud del suelo.

Adicionalmente en el estudio de Zuo et al. (2024) evidenció que la interacción de múltiples pesticidas modificó el pH y la disponibilidad de compuestos químicos, lo cual tuvo un impacto negativo reduciendo la fertilidad y aumentando la toxicidad del entorno ecológico del suelo. La bioacumulación en suelos de residuos de pesticidas en especial de clorpirifós, afectó parámetros como la capacidad de retención de nutrientes y la estabilidad de la materia orgánica, lo cual limita el reciclaje natural de nutrientes en el suelo.

En conclusión, esta interacción entre pesticida y la microbiota del suelo disminuye factores esenciales y vitales que tiene el ecosistema del suelo para llevar a cabo sus procesos biogeoquímicos, resaltando que esta interacción no solo acaba con la calidad del suelo a largo plazo, sino que también afecta a las comunidades microbianas que conforman el suelo.

3.1.4. Alteraciones enzimáticas del suelo

Es necesario ser más específicos sobre la acción de los distintos pesticidas sobre la actividad de las enzimas en el suelo para comprender cómo estos inducen inhibiciones, adaptaciones y reconfiguraciones enzimáticas.

Estudio como el de Idris et al. (2024) señala que las enzimas microbianas del suelo son indicadores muy sensibles de la perturbación causada por agroquímicos. Estas enzimas están involucradas en procesos importantes como la mineralización de nutrientes y ciclos del suelo como el de carbono, por lo cual su reacción rápida frente a la aplicación de pesticidas en los suelos demuestra cambios en su actividad antes de que se evidencien modificaciones a simple vista en la fertilidad del suelo.

Las enzimas del suelo tienen un rol fundamental en la dinámica de los ecosistemas del suelo, dado que estos intervienen en la descomposición de la materia orgánica, la liberación de nutrientes y la degradación de compuestos químicos contaminantes, en este caso pesticidas. Sin embargo, la exposición a pesticidas puede alterar tanto su actividad como su disponibilidad, afectando de manera directa los procesos bioquímicos que sostienen la fertilidad del suelo

Los pesticidas persistentes, como algunos organoclorados, tienden a inhibir la actividad enzimática y a alterar la estructura de la comunidad microbiana durante largos periodos, mientras que compuestos menos persistentes como ciertos piretroides o neonicotinoide producen efectos más transitorios sobre la comunidad microbiana.

Según el estudio de Vázquez et al. (2021), la aplicación del herbicida glifosato modificó de manera significativa la actividad de las enzimas oxidativas y fosfatasa en suelos agrícolas. Se observó una disminución de la deshidrogenasa y la catalasa, enzimas clave en la respiración microbiana, junto con un descenso de la fosfatasa ácida y alcalina, lo que sugiere una interferencia directa sobre las rutas del fósforo.

Por su parte, Dhuldhaj et al. (2023) destacaron que la exposición prolongada a mezclas de insecticidas organofosforados y carbamatos provoca la inhibición de la acetilcolinesterasa y de enzimas hidrolíticas como la ureasa y la β -glucosidasa. Esto ocurre porque dichos compuestos actúan sobre los grupos tiol de las proteínas, alterando su estructura tridimensional. A nivel microbiano, esta alteración conlleva una reducción de la capacidad de degradar residuos y de reciclar compuestos nitrogenados.

Según Serbent et al. (2021) evidenció que el uso prolongado de pesticidas en cultivos de arroz provocó una drástica reducción en la nitrato reductasa y en la deshidrogenasa, reflejando una pérdida de la capacidad microbiana para transformar compuestos nitrogenados. La alteración fue paralela a una disminución en la abundancia de hongos filamentosos y bacterias del género *Nitrosomonas*, esenciales para la nitrificación. Esta combinación de pérdida enzimática y desplazamiento microbiano conduce a un suelo empobrecido biológicamente, donde los procesos redox y de reciclaje son insuficientes para mantener la estabilidad química.

Astaykina et al. (2020) también observaron cambios en la estructura de las comunidades microbianas en suelos agrosódico-podzólicos tratados con pesticidas, se refleja una disminución de la oxidorreductasa y la ureasa, causada por el daño estructural a la biomasa microbiana y la acidificación local. Los suelos con menor contenido de materia orgánica mostraron mayor vulnerabilidad, debido a la falta de protección coloidal de las enzimas extracelulares. Esto indica que los pesticidas no solo alteran la composición microbiana, sino que también destruyen la matriz enzimática extracelular, reduciendo la capacidad del suelo para recuperarse tras exposiciones repetidas.

Ma et al. (2023) reportaron que mezclas de herbicidas influyen directamente en las comunidades asociadas a las raíces del maíz, afectando la ureasa y la β -glucosidasa. Estos cambios se traducen en una reducción de la disponibilidad de nitrógeno y carbono, fundamentales para la nutrición vegetal y la actividad microbiana. La disminución de la ureasa se asocia con una menor eficiencia en la

mineralización del nitrógeno orgánico. Según los autores, esta disfunción puede revertirse mediante la incorporación de abonos orgánicos y control de humedad, que reactivan la síntesis de enzimas dependientes de cofactores metálicos.

De esta forma se demuestra que la inhibición enzimática no solo limita la capacidad del suelo para mantener su equilibrio bioquímico, sino que también se ve afectada la interacción entre los microorganismos, cultivos, plantas, entre otros. De este modo, las funciones metabólicas vitales se ven reducidas, comprometiendo la salud del ecosistema suelo–cultivo.

El estudio de Wijntjes et al. (2022) advirtió que la exposición simultánea a herbicidas y fungicidas genera un efecto sinérgico de inhibición enzimática, donde la toxicidad combinada prolonga el tiempo de degradación de los compuestos. Se reportó una disminución conjunta de la fosfatasa y la β -glucosidasa, debido a la alteración de la expresión génica microbiana. Esta represión metabólica genera un ciclo de retroalimentación negativa, la menor disponibilidad de nutrientes impide la síntesis de nuevas enzimas, amplificando el deterioro funcional del suelo. Dicho fenómeno evidencia cómo las mezclas químicas multiplican la pérdida enzimática, incluso en dosis legalmente permitidas.

Desde la microbiología, esta inhibición puede explicarse por el bloqueo de sitios activos enzimáticos por residuos del herbicida o por estrés oxidativo en las células microbianas. Además, estos resultados confirman que la aplicación prolongada reduce la capacidad metabólica del suelo, generando un estado de anemia bioquímica, donde los microorganismos no logran sostener la mineralización normal de nutrientes (Tabla 7).

Por lo anterior, se deben emplear rotaciones de pesticidas menos persistentes y favorecer la incorporación de enmiendas orgánicas que estimulen la síntesis de nuevas enzimas. En consecuencia, los suelos tratados repetidamente con estos compuestos se vuelven enzimáticamente inertes, incapaces de sostener la dinámica natural del suelo.

Por su parte, Guo et al. (2025) identificaron una distribución espacial heterogénea de la actividad enzimática en suelos aluviales contaminados con residuos persistentes. Las zonas de mayor concentración de pesticidas mostraron bloqueo casi total de la deshidrogenasa y la fosfatasa, mientras que en sectores menos contaminados se observó una ligera sobreexpresión compensatoria. Este patrón fragmenta la funcionalidad del ecosistema microbiano y produce un paisaje bioquímico disfuncional, donde la recuperación es parcial y desigual.

McGinley et al.(2023) demostraron que la acumulación histórica de pesticidas en suelos europeos ha generado un efecto de “herencia enzimática”, donde las comunidades microbianas presentan una capacidad reducida de respuesta ante nuevas exposiciones. Esto se debe a la pérdida de grupos funcionales

degradadores. A largo plazo, dicha presión selectiva deriva en suelos con baja variabilidad funcional y alta dependencia de microorganismos resistentes.

Esta situación indica que las enzimas del suelo pueden sufrir inhibición heredada, donde la pérdida de diversidad genética microbiana impide la recuperación total de las funciones catalíticas. La consecuencia directa es un suelo biológicamente envejecido, con una capacidad mínima para degradar compuestos orgánicos o sostener ciclos biogeoquímicos.

De manera complementaria, Han et al. (2024) analizaron la degradación de los fungicidas imazalil y penflufen, mostrando que la transformación de estos compuestos depende de la acción de enzimas microbianas específicas. Aunque las bacterias del suelo intentan degradar los pesticidas, la exposición prolongada genera cambios en los perfiles funcionales de la comunidad bacteriana, afectando la producción y eficiencia de enzimas vinculadas a los ciclos del carbono y del nitrógeno. Esto demuestra una doble consecuencia: por un lado, los pesticidas ejercen presión sobre la microbiota, alterando la síntesis enzimática, y por otro, las enzimas del suelo se ven forzadas a actuar en la degradación de compuestos tóxicos en lugar de cumplir sus funciones ecológicas habituales.

Los pesticidas no solo reducen la actividad enzimática en el suelo, sino que también desvían su función hacia la degradación de contaminantes. Esta alteración genera un desequilibrio en los ciclos biogeoquímicos, comprometiendo la disponibilidad de nutrientes, la calidad del suelo y su capacidad de resiliencia frente a nuevas perturbaciones ambientales.

Los autores Zheng et al. (2025); Zhang et al. (2024) demostraron que los pesticidas alteran la función metabólica microbiana, causando así la reducción de su actividad enzimática que son etapas claves para el ciclo del nitrógeno. Al disminuir la cantidad de rutas metabólicas alternativas, cualquier inhibición puntual se traduce en una disfunción total del ecosistema. Este colapso funcional genera un suelo químicamente activo, pero biológicamente degradado.

Los pesticidas tienen la capacidad de modificar genéticamente los microorganismos del suelo, lo cual genera consecuencias directamente en la producción de enzimas, disminuyendo la actividad enzimática, alterando procesos como la mineralización de nutrientes, la disponibilidad de carbono y la transformación de compuestos orgánicos del suelo, afectando el metabolismo en general de la microbiota. Este efecto depende de la persistencia del pesticida y de la capacidad de los microorganismos para adaptarse, siendo transitorio o prolongado, además de las características del suelo, como su contenido de materia orgánica, humedad (Yu et al., 2024).

Se ha observado que la adición de enmiendas orgánicas puede mitigar los efectos negativos de los pesticidas al aportar sustratos que favorecen la recuperación de la microbiota y su actividad enzimática (Virk et al., 2025). La adición de materia

orgánica no solo promueve la multiplicación y proliferación de microorganismos, sino que también restaura la actividad de enzimas degradadoras, mejorando la resiliencia del ecosistema del suelo frente a pesticidas y otros contaminantes.

Tabla 7. Enzimas afectadas por pesticidas

Enzima afectada	Función principal en el suelo	Tipo de pesticida	Daño enzimático	Consecuencia microbiana/ecológica
Deshidrogenasa	Indicadora de respiración microbiana y oxidación de sustratos	Herbicidas y fungicidas (glifosato, imazalil)	Inhibición de la cadena de transporte de electrones	Disminución de la respiración y de la biomasa activa
Fosfatasa ácida/alcalina	Liberación de fósforo orgánico	Herbicidas y combinaciones químicas	Desnaturalización por estrés oxidativo	Reducción de fósforo disponible y menor actividad microbiana
Ureasa	Transformación del nitrógeno orgánico en amonio	Organofosforados y carbamatos	Fosforilación irreversible y pérdida de función	Disminución de nitrificación y acumulación de urea
β -Glucosidasa	Degradación de materia orgánica y celulosa	Herbicidas persistentes	Inhibición de rutas catabólicas del carbono	Menor descomposición de materia orgánica
Catalasa	Neutraliza radicales de peróxido	Fungicidas e insecticidas	Daño oxidativo y pérdida de estructura proteica	Estrés oxidativo celular y muerte microbiana
Oxidasa/peroxidasas	Transformación de compuestos aromáticos	Insecticidas y fungicidas	Inhibición de oxidación enzimática	Bloqueo en la degradación de xenobióticos
Nitrato reductasa	Reducción de nitratos a nitritos	Herbicidas y residuos mixtos	Represión génica y pérdida de actividad	Interrupción del ciclo del nitrógeno

Fuente: Elaboración propia con base en Vázquez et al. (2021); Dhuldhaj et al. (2023); Astaykina et al. (2020); Serbent et al. (2021); Han et al. (2023); Sim et al. (2023); Wijntjes et al. (2022); Zheng et al. (2025); Guo et al.

(2025); Riedo et al. (2025); Mäder et al. (2025); Ni et al. (2025); Zhang et al. (2024); McGinley et al. (2023); Virk et al. (2025).

El análisis comparativo de las enzimas presentadas evidencia que la exposición a pesticidas afecta principalmente aquellas relacionadas con los ciclos del carbono, nitrógeno y fósforo, lo cual repercute directamente en la fertilidad y resiliencia del suelo. La deshidrogenasa y la fosfatasa, consideradas marcadores universales de la actividad microbiana, son particularmente vulnerables a los compuestos organofosforados y triazólicos, generando una disminución en la mineralización y el reciclaje de nutrientes.

3.1.1 Estrategias de conservación de la actividad biológica del suelo ante el uso de pesticidas

La conservación de la actividad biológica del suelo depende de la capacidad de los microorganismos para mantener sus funciones metabólicas frente a la exposición a pesticidas. Por lo tanto, en esta sesión se busca analizar los puntos clave para comprender cómo responde la microbiota a las perturbaciones químicas y qué prácticas permitirían recuperar su estabilidad funcional.

Análisis comparativo de estudios y estrategias derivadas

La persistencia o no de pesticidas en los suelos depende en gran parte de su adsorción a partículas y de la presencia de microorganismos capaces de degradarlos. El estudio de Streletskii et al. (2023) analizó cómo la exposición prolongada a pesticidas Benomyl (fungicida), Metribuzin (herbicida) e Imidacloprid altera las comunidades bacterianas y fúngicas del suelo. El suelo mostró una recuperación natural a través de sus propios mecanismos biológicos y ecológicos, mediante procesos de adaptación y autorregulación microbiana. Confirmando los autores que, al usar correctamente la dosis de los pesticidas, el suelo, al tener una alta capacidad de resiliencia ecológica, es capaz de recuperarse de la toxicidad causada por pesticidas sin requerir intervenciones externas.

Según el estudio de Benoit et al. (2023) los suelos con alto contenido de materia orgánica presentan una mayor capacidad de retención, lo que disminuye la biodisponibilidad del contaminante y da tiempo a las comunidades microbianas para adaptarse y degradarlo. Microbiológicamente, esto implica que la materia orgánica actúa como una barrera bioquímica, al reducir el estrés sobre enzimas sensibles como la deshidrogenasa y la fosfatasa. Por tanto, una estrategia efectiva de conservación sería aumentar la estabilidad del carbono orgánico mediante compost o abonos naturales, que a su vez sirven de sustrato para la síntesis enzimática y regeneran los ciclos biogeoquímicos.

En el trabajo de Schleiffer & Speiser (2022), se describe que los sistemas agrícolas con manejo orgánico presentan menores concentraciones residuales de pesticidas y una mayor diversidad microbiana que los sistemas convencionales. Este resultado se explica por la menor presión química y por el uso de insumos menos persistentes,

lo que favorece la recomposición de las comunidades bacterianas. Al reducir el número de moléculas tóxicas activas, las poblaciones de bacterias heterótrofas y actinomicetos logran restablecer sus redes tróficas y aumentar la síntesis de enzimas oxidativas. De este modo, la transición a prácticas agroecológicas u orgánicas se plantea como una estrategia sólida para la conservación de la vida microbiana del suelo.

Por su parte, Sandeep et al. (2024) analizaron la movilidad y acumulación de pesticidas en función de la textura y del contenido de arcilla del suelo. Se demostró que los suelos húmedos y finos retienen más compuestos químicos, lo cual alarga su persistencia y toxicidad sobre los microorganismos.

Según Zhang et al. (2022) estudio la interacción de pesticidas quirales en los suelos, donde se demostró que los enantiómeros se degradan de manera más lenta, lo cual acumulaba en el suelo causando una toxicidad mayor y selectiva en grupos microbianos. Los autores resaltan que se debe ajustar su aplicación y evaluar los efectos de cada una de las dosis en función de su quiralidad, como estrategia preventiva, evitando la acumulación de este.

El estudio de Walder et al. (2022) observó las diferentes concentraciones de pesticidas que se encuentran en los suelos agrícolas, y se demostró que algunos microorganismos se relacionaban con los niveles de contaminación, y los suelos que tenían bajos niveles de pesticidas se encontraron microorganismos como *Pseudomonas* y *Bacillus*, a comparación de suelos con alto nivel de pesticidas se encontraron microorganismos resistentes. Esto confirma que la contaminación prolongada reduce la eficiencia metabólica y altera los ciclos de nutrientes. En consecuencia, una estrategia de conservación debe centrarse en promover la recolonización microbiana mediante la adición de enmiendas orgánicas, que aporten sustratos energéticos y mejoren la diversidad funcional.

Khalid et al. (2020) demostraron que el uso de biochar en suelos agrícolas disminuye la biodisponibilidad de pesticidas al adsorberlos en su superficie porosa, reduciendo su efecto tóxico sobre las comunidades microbianas. Además, el biochar proporciona microhábitats que facilitan la colonización de bacterias degradadoras. Desde una perspectiva microbiológica, este material crea zonas de refugio donde las enzimas extracelulares pueden mantenerse activas incluso en presencia de compuestos tóxicos. La aplicación práctica sería la incorporación de biochar combinado con compost maduro, para estabilizar las condiciones fisicoquímicas y restaurar la capacidad de degradación natural del suelo.

Según el trabajo de Li et al. (2025), la remediación de suelos contaminados por herbicidas de larga duración requiere enfoques combinados que incluyan adsorción, degradación biológica y manejo físico del suelo. Los autores proponen el uso de consorcios bacterianos y enmiendas del suelo como el biochar, mejora la mineralización y reduce la movilidad de los contaminantes. Desde la microbiología, esta sinergia potencia la co-metabolización, al ofrecer fuentes de carbono y

electrones que estimulan enzimas como las oxidasas y peroxidasas. En la práctica, la estrategia más efectiva sería combinar biochar con inoculantes microbianos específicos para acelerar la degradación y conservar la actividad enzimática general.

El estudio de Dar et al. (2022) es facilitar la biodegradación y biorremediación de pesticidas por medio de los compuestos naturales del suelo como las enzimas, lacasas, peroxidasas, dehalogenasas y oxidorreductasas. Los autores demostraron que estos compuestos naturales en conjunto como biosurfactantes, ácidos orgánicos, metabolitos fenólicos, aumentan la biodisponibilidad de los pesticidas y estimulan la actividad de los microorganismos del suelo, recuperando el ecosistema del suelo, demostrando así que la biorremediación es más eficiente, ecológica y sostenible, dejando a un lado métodos químicos.

Sim et al. (2022) analizaron y evaluaron cómo los pesticidas influían negativamente en el ciclo de nitrógeno. Analizando cómo las enzimas esenciales (nitrato reductasa y ureasa) iban en un pico de disminución en cada aplicación de manera prolongada, debilitando el ecosistema del suelo. Sin embargo, al evaluar cómo recuperar el suelo, aplicaron enmiendas orgánicas, como son el compost y biochar; se observó cómo el suelo se recuperaba enzimáticamente, confirmando que para restaurar el suelo no solo debe eliminar por completo estos contaminantes químicos, sino que además debe recuperar y restaurar las rutas metabólicas microbianas.

La revisión sistemática de estos estudios e investigaciones, deben priorizar un enfoque integral, para reducir la persistencia de estos compuestos químicos, tóxicos, adaptados a prácticas agrícolas sostenibles, usando las enmiendas orgánicas, biochar, la bioaumentación de las comunidades microbianas degradadoras, ya que demuestran alternativas sostenibles y eficaces para restaurar y reducir la prolongación de pesticidas en el suelo, mejorando la ecología de él. Además de implementar monitoreos biológicos garantizando que estas prácticas se estén realizando de manera correcta, para mejorar la recuperación progresiva de los suelos afectados.

4. CONCLUSIONES

Las revisiones de la literatura permitieron evidenciar que la persistencia de los pesticidas está determinada por diferentes factores, entre ellos, la reducción de las propiedades fisicoquímicas del suelo y las características del suelo como humedad, pH, materia orgánica, entre otras, por el uso prolongado de pesticidas alterando la estructura y microbiota del suelo.

Se logró identificar que los pesticidas más persistentes en los suelos agrícolas son los organoclorados como son DDT, HCH, endosulfán, los organofosforados, como son los clorpirifos y diazinón y herbicidas, principalmente el glifosato, que mantienen un largo período de tiempo en el suelo. Sin embargo, los pesticidas organoclorados

tienden a ser más persistentes en el suelo, ya que estos son lipofílicos y tienden a bioacumularse, lo que aumenta su concentración, haciendo que persista por largos periodos de tiempo, cabe aclarar que estos tipos de pesticida poseen enlaces carbono-cloro, y son demasiado fuertes, y tienden a ser más estables frente a la luz solar, el calor y la degradación biológica. Los microorganismos encargados de degradar estas sustancias tóxicas del suelo carecen de enzimas para romper estos enlaces. Comparándolos con los organofosforados o los carbamatos, tienen enlaces mucho más débiles, tienden a romperse mucho más rápido, degradándose por oxidación o degradación ambiental (luz solar o calor), resaltando que los organoclorados son más estables y sus átomos de cloro protegen su anillo de carbono, brindándole estabilidad y persistencia.

Se identificó que los microorganismos más afectados por la exposición a pesticidas son bacterias nitrificantes (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*), *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Aspergillus*. Las bacterias nitrificantes son sensibles a la acidificación y a compuestos que alteran la oxidación, ya que estas interrumpen la conversión de amonio a nitrato afectando directamente el ciclo de nitrógeno, limitando la biodisponibilidad del suelo. Asimismo, como son las bacterias degradadoras que son *Pseudomonas* y *Bacillus*, muestran un “estrés oxidativo” frente a pesticidas, ya que estos compuestos se acumulan en las membranas de las bacterias interfiriendo en las rutas de nutrientes y el intercambio de protones, teniendo como consecuencia la pérdida de energía y desequilibrio osmótico, inhibiendo su supervivencia y la capacidad metabólica de estas. *Aspergillus* suelen ser tolerantes a acidez, y desempeñan un rol muy importante en descomponer la materia orgánica, al haber una pérdida significativa de estas especies u otros tipos de hongos, se reduce la liberación de enzimas celulares como celulasas, quitinasas y ligninas, volviendo mucho más lenta la descomposición y alteración del carbono del suelo.

Todos estos mecanismos del uso intensivo de pesticidas alteran la microbiota del suelo, lo que afecta directamente su estructura y funcionalidad. Disminuyendo la biomasa de microorganismos, afectando la funcionalidad de degradar materia orgánica, retención de agua y la biodisponibilidad de nutrientes. La reducción de las enzimas claves limita la respiración bacteriana, la ureasa bloquea la hidrólisis de urea, afectando directamente la biodisponibilidad de amonio y fosfatasa, reduciendo globalmente la mineralización de nutrientes.

Por ello es de vital importancia promover estrategias de sostenibilidad, reduciendo el uso de pesticidas e incorporando estrategias de enmiendas orgánicas e indicadores biológicos del suelo y preservar la actividad microbiana del suelo es fundamental para mantener una productividad agrícola, y además garantiza estabilidad y la salud ecológica del suelo.

5. DECLARACION DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La autora declara que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este artículo

6. CONFLICTO DE INTERESES

La autora declara que no tienen conflicto de intereses

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Astaykina, A.A., Streletskii, R.A., Maslov, M.N. et al. The Impact of Pesticides on the Microbial Community of Agrosoddy-Podzolic Soil. *Eurasian Soil Sc.* 53, 696–706 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1064229320050038>

Balázs, H. E., Schmid, C. A. O., Podar, D., Hufnagel, G., Radl, V., & Schröder, P. (2020). Development of microbial communities in organochlorine pesticide contaminated soil: A post-reclamation perspective. *Applied Soil Ecology*, 150, Article 103467. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103467>

Benoit, P., Mamy, L., Bedos, C., & Barriuso, E. (2023). Pesticide fate in soils. En M. J. Goss & M. Oliver (Eds.), *Encyclopedia of soils in the environment* (2.^a ed., pp. 470–482). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00122-1>

Barrios Serna, K. V., Orozco Núñez, D. M., Pérez Navas, E. C., & Conde Cardona, G. C. (2021). Nuevas recomendaciones de la versión PRISMA 2020 para revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Acta Neurológica Colombiana*, 37(2), 105–106.

Bravo, A., Rojas, C., & Fernández, M. (2021). Influencia de la textura del suelo en la persistencia de herbicidas en ambientes agrícolas. *Revista de la Sociedad Chilena de Química*, 66(1), 50–86.

Begoña, M., Muñoz, M., Cuellar, J., Domancic, S., & Villanueva, J. (2018). Revisiones sistemáticas: definición y nociones básicas. *Revista Clínica PIRO*, 11(3), 184–186.

Bokade, P., Gaur, V. K., Tripathi, V., Bobate, S., Manickam, N., & Bajaj, A. (2023). *Bacterial remediation of pesticide polluted soils: Exploring the feasibility of site restoration. Journal of Hazardous Materials*, 441, 129906. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129906>

Chaudhary, V., Kumar, M., Chauhan, C., Sirohi, U., Srivastav, A. L., & Rani, L. (2024). Strategies for mitigation of pesticides from the environment through alternative approaches: A review of recent developments and future prospects. *Journal of Environmental Management*, 354, Article 120326. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120326>

Chia, X. K., Hadibarata, T., Kristanti, R. A., & et al. (2024). The function of microbial enzymes in breaking down soil contaminated with pesticides: A review. *Bioprocess*

and Biosystems Engineering, 47, 597–620. <https://doi.org/10.1007/s00449-024-02978-6>

Dar, M. A., Shahnawaz, M., Hussain, K., Gupta, P., Sirwal, M. Y., Sadaqat, B., Gazal, S., Akhtar, R., Parihar, S., Zhu, D., Adetunji, C. O., Fardos, T., Parihar, J., Omorefosa, O. O., Xie, R., Sun, J., Meena, S. N., Nandre, V., Kodam, K., & Meena, R. S. (2022). Natural compounds for bioremediation and biodegradation of pesticides. En K. F. Mendes, R. N. de Sousa, & K. C. Mielke (Eds.), *Biodegradation technology of organic and inorganic pollutants* (pp. 470–482). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94650>

Dhuldhaj, U.P., Singh, R. & Singh, V.K. Pesticide contamination in agro-ecosystems: toxicity, impacts, and bio-based management strategies. *Environ Sci Pollut Res* 30, 9243–9270 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24381-y>

Drocco, C., Coors, A., Devers, M., Martin-Laurent, F., Rouard, N., & Spor, A. (2025). Evaluating the effects of environmental disturbances and pesticide mixtures on N-cycle related soil microbial endpoints. *Peer Community Journal*, 5, Article 537. <https://doi.org/10.24072/pcjournal.537>

Egbe, C. C., Oyetibo, G. O., & Ilori, M. O. (2021). Ecological impact of organochlorine pesticides consortium on autochthonous microbial community in agricultural soil. *Environmental Pollution*, 285, 117397. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117397>

Gandhi, K., Khan, S., Patrikar, M., Markad, A., Kumar, N., Choudhari, A., Sagar, P., & Indurkar, S. (2021). Exposure risk and environmental impacts of glyphosate: Highlights on the toxicity of herbicide co-formulants. *Environmental Challenges*, 4, Article 100149. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100149>

Gorodylova, N., Michel, C., Seron, A., Joulian, C., Delorme, F., Bresch, S., Garreau, C., Giovannelli, F., & Michel, K. (2021). Modified zeolite-supported biofilm in service of pesticide biodegradation. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(33), 45296–45316. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13876-9>

Guo, S., Zhang, S., Zhang, J., Lei, J., & Chen, H. (2025). Occurrence, residue level, distribution and risk assessment of pesticides in the typical polder areas of Lake Dongting. *Journal of Hazardous Materials*, 496, 139530. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139530>

Han, L., Xu, H., Wang, Q., Liu, X., Li, X., Wang, Y., Nie, J., Liu, M., Ju, C., & Yang, C. (2023). Deciphering the degradation characteristics of the fungicides imazalil and penflufen and their effects on soil bacterial community composition, assembly, and functional profiles. *Journal of Hazardous Materials*, 460, 132379. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132379>

Idris, A.D., Bello, A.B., Hussaini, I.M., Umar, U.A., Abdulrahim, U. (2024). Soil Microbial Enzymes and Applications. In: Aransiola, S.A., Atta, H.I., Maddela, N.R. (eds) *Soil Microbiome in Green Technology Sustainability*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71844-1_18

Jat, M., Dohling, P. N. K., Ahuja, A., & Singh, J. (2022). Effect of pesticides on soil ecosystem services and processes. *Indian Journal of Entomology*, 84(4).
<https://doi.org/10.55446/IJE.2021.5>

Khalid, S., Shahid, M., Murtaza, B., Bibi, I., Natasha, N., Naeem, M. A., & Niazi, N. K. (2020). A critical review of different factors governing the fate of pesticides in soil under biochar application. *Science of the Total Environment*, 746, 141–149.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141149>

Khmelevtsova, L., Konstantinova, E., Karchava, S., Klimova, M., Azhogina, T., Polienko, E., Khammami, M., Sazykin, I., & Sazykina, M. (2023). Influence of pesticides and mineral fertilizers on the bacterial community of arable soils under pea and chickpea crops. *Agronomy*, 13(3).
<https://doi.org/10.3390/agronomy13030750>

Li, J., Huang, H., Yang, Y., Wang, C., & Zhang, Q. (2025). Contamination remediation and risk assessment of four typical long-residual herbicides: A timely review. *Science of The Total Environment*, 997, 180169.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180169>

Li, P., Zhai, W., Li, B., Guo, Q., Wang, Y., Gu, Y., Zheng, L., Zhao, F., Liu, X., Wang, P., & Liu, D. (2025). Glyphosate and urea co-exposure: Impacts on soil nitrogen cycling. *Journal of Hazardous Materials*, 492, 138150.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138150>

Li, S., Sharma, P., Pandey, A., Tong, Y. W., & Ngo, H. H. (2022). Phytoremediation of pesticides in soil. *En Phytoremediation of Pesticides* (pp. 291–312). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-323-99907-6.00007-4>

Loose, L. P., Ulrich, U., & Fohrer, N. (2025). Investigating pesticide contamination in arable soils: An advanced monitoring study from Northern Germany. *Science of the Total Environment*, 710, 136321.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136321>

López, M., Hernández, G., & Castro, J. (2022). Equilibrio de retención y biodisponibilidad de plaguicidas en suelos francos. *Revista AgroCiencia Latina*, 35(2), 88–96.

Ma, Q., Li, Q., Wang, J., Parales, R. E., Li, L., & Ruan, Z. (2023). Exposure to three herbicide mixtures influenced maize root-associated microbial community structure, function and the network complexity. *Environmental Pollution*, 322, 122393. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122393>

Ma, Q., Zhou, Y., Parales, R. E., Jiao, S., Ruan, Z., & Li, L. (2025). Effects of herbicide mixtures on the diversity and composition of microbial community and nitrogen cycling function on agricultural soil: A field experiment in Northeast China. *Environmental Pollution*, 336, 125965.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125965>

Mäder, P., Listl, A., Hochmanová, Z., Armbruster, W., Harkes, P., Poll, C., & Kandeler, E. (2025). Transfer of prosulfocarb and boscalid residues from maize

leaves to soil and their effects on soil microorganisms. *Environmental Pollution*, 300, 118952. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118952>

Mäder, P., Stache, F., Engelbart, L., Huhn, C., Hochmanová, Z., Hofman, J., Poll, C., & Kandeler, E. (2024). Effects of MCPA and difenoconazole on glyphosate degradation and soil microorganisms. *Environmental Pollution*, 362, 124926. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124926>

Maharana, B., Mahalle, S., Bhende, R. et al. Repercussions of Prolonged Pesticide Use on Natural Soil Microbiome Dynamics Using Metagenomics Approach. *Appl Biochem Biotechnol* 197, 73–93 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12010-024-05033-y>

Mauser, K. M., Brühl, C. A., & Zaller, J. G. (2024). Herbicide effects on nontarget organisms, biodiversity and ecosystem functions. En S. A. Levin (Ed.), *Encyclopedia of biodiversity* (3^a ed., Vol. 18, pp. 1–20). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822562-2.00080-3>

McGinley, J., Healy, M. G., Ryan, P. C., O'Driscoll, J. H., Mellander, P.-E., Morrison, L., & Siggins, A. (2023). Impact of historical legacy pesticides on achieving legislative goals in Europe. *Science of The Total Environment*, 873, 162312. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162312>

Ni, B., Xiao, L., Lin, D., Zhang, T. L., Zhang, Q., Liu, Y. J., Chen, Q., Zhu, D., Qian, H. F., Rillig, M. C., & Zhu, Y. G. (2025). Increasing pesticide diversity impairs soil microbial functions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 122(2), Article e2419917122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2419917122>

Omeiri, M. H., Khnayzer, R. S., & Yusef, H. H. (2022). Monitoring of pesticide residues in Lebanese vegetables and agricultural soils and their impact on soil microbiological properties. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 19(6). <https://doi.org/10.3233/AJW220085>

Peprah, S., Addo-Fordjour, P., Fei-Baffoe, B., Boampong, K., Avicor, S. W., & Damsere-Derry, J. (2025). Effects of pesticide application on soil bacteria community structure in a cabbage-based agroecosystem in Ghana. *PLOS ONE*, 20(5), Article e0323936. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323936>

Pérez, L., Torres, N., & Vega, R. (2020). Comportamiento de plaguicidas lipofílicos en suelos con alto contenido de materia orgánica. *Soil Biology Reports*, 8(1), 22–34.

Phian, S., Nagar, S., Kaur, J., & Rawat, C. D. (2022). Emerging issues and challenges for microbes-assisted remediation. En *Microbes and Microbial Biotechnology for Green Remediation* (pp. 47-89). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90452-0.00026-8>

Punniyakotti, P., Vinayagam, S., Rajamohan, R., Priya, S. D., Moovendhan, M., & Sundaram, T. (2025). Environmental fate and ecotoxicological behaviour of pesticides and insecticides in non-target environments: Nanotechnology-based

mitigation strategies. *Environmental Pollution*, 342, 121379.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.121379>

Riedo, J., Dueñas, J. F., Mbedi, S., Sparmann, S., & Rillig, M. C. (2025). Abrupt versus gradual application of pesticides: Effects on soil bacterial and fungal communities. *Environmental Pollution*, 383, Article 126859.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126859>

Rinaldy, R., & Pahira, S. H. (2025). Long-term effects of agrofarmaceutic (pesticide category) use on soil microbial communities and water resources. *EQA-International Journal of Environmental Quality*, 69, Article number or pages if available. <https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/21556>

Ruuskanen, S., Fuchs, B., Nissinen, R., Puigbò, P., Rainio, M., Saikkonen, K., & Helander, M. (2023). Ecosystem consequences of herbicides: The role of microbiome. *Trends in Ecology & Evolution*, 38(1), 35-43.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.09.009>

Sandeep, Sharma, S., Sharma, A., Bala, R., Sharma, I., Sharma, A., Sharma, A., Kumar, V., & Zheng, B. (2024). Pesticide biology in soil: Sorption, leaching, and accumulation. In *Pesticides in the environment* (pp. 49–66). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-323-99427-9.00013-6>

Sarker, A., Shin, W. S., Al Masud, M. A., Nandi, R., & Islam, T. (2024). A critical review of sustainable pesticide remediation in contaminated sites: Research challenges and mechanistic insights. *Environmental Pollution*, 341, Article 122940.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122940>

Santana-Mayor, Á., Rodríguez-Ramos, R., Herrera-Herrera, A. V., Socas-Rodríguez, B., & Rodríguez-Delgado, M. A. (2023). Updated overview of QuEChERS applications in food, environmental and biological analysis (2020–2023). *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 169, Article 117375.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117375>

Schäffer, A., & Wijntjes, C. (2022). Changed degradation behavior of pesticides when present in mixtures. *Eco-Environment & Health*, 1(1), 23–30.
<https://doi.org/10.1016/j.eehl.2022.02.002>

Schleiffer, M., & Speiser, B. (2022). Presence of pesticides in the environment, transition into organic food, and implications for quality assurance along the European organic food chain – A review. *Environmental Pollution*, 313, 120116.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120116>

Serbent, M.P., dos Anjos Borges, L.G., Quadros, A. et al. Prokaryotic and microeukaryotic communities in an experimental rice plantation under long-term use of pesticides. *Environ Sci Pollut Res* 28, 2328–2341 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-10614-5>

Shahid, M., Khan, M. S., & Singh, U. B. (2023). Pesticide-tolerant microbial consortia: Potential candidates for remediation/clean-up of pesticide-contaminated agricultural soil. *Environmental Research*, 236, Article 116724. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116724>

Sharma, R., Walia, A., Putatunda, C., Solanki, P., Singh, J., Pandey, A., Singh, S., Garg, V. K., & Ramamurthy, P. (2023). Impact of pesticides on microbial diversity. In J. Singh, A. Pandey, S. Singh, V. K. Garg, & P. Ramamurthy (Eds.), *Current developments in biotechnology and bioengineering* (pp. 427–458). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91900-5.00001-1>

Sharma, P., & Gupta, D. (2023). Clay mineralogy effects on pesticide adsorption and desorption. *Geoderma Regional*, 33, e00785.

Siedt, M., Schäffer, A., Smith, K. E. C., Nabel, M., Roß-Nickoll, M., & van Dongen, J. T. (2021). Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides. *Science of The Total Environment*, 751, 141607. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141607>

Sim, J. X. F., Doolette, C. L., Vasileiadis, S., Drigo, B., Wyrsh, E. R., Djordjevic, S. P., Donner, E., Karpouzas, D. G., & Lombi, E. (2022). Pesticide effects on nitrogen cycle related microbial functions and community composition. *Science of the Total Environment*, 807, Article 150734. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150734>

Sim, J. X. F., Drigo, B., Doolette, C. L., Vasileiadis, S., Donner, E., Karpouzas, D. G., & Lombi, E. (2023). Repeated applications of fipronil, propyzamide and flutriafol affect soil microbial functions and community composition: A laboratory-to-field assessment. *Chemosphere*, 331, 138850. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138850>

Singh, R., Kumar, P., & Meena, R. S. (2021). Pesticide behavior in different soil textures and its environmental implications. *The Pharma Innovation Journal*, 11(4), 403–465

Steiner, M., Falquet, L., Fragnière, A. L., Brown, A., & Bacher, S. (2024). Effects of pesticides on soil bacterial, fungal and protist communities, soil functions and grape quality in vineyards. *Ecological Solutions and Evidence*, 5(2), Article e12327. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12327>

Streletskii, R., Astaykina, A., Cheptsov, V., Belov, A., & Gorbatov, V. (2023). Effects of the pesticides benomyl, metribuzin and imidacloprid on soil microbial communities in the field. *Agriculture*, 13(7), Article 1330. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071330>

Stupar, V., Živković, M., Mihajlović, I., Antić, B., & Nešić, L. (2024). Decrease in soil fertility based on monitoring during 2017–2022 and proposal of measures to improve fertility in conventionally managed lands. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 52(1), 13389. <https://doi.org/10.15835/nbha52113389>

Swaine, M., Bergna, A., Oyserman, B., Vasileiadis, S., Karas, P. A., Screpanti, C., & Karpouzas, D. G. (2025). Impact of pesticides on soil health: Identification of key soil microbial indicators for ecotoxicological assessment strategies through meta-analysis. *FEMS Microbiology Ecology*, 101(6), Article fiaf052. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiaf052>

Tripathi, S., Srivastava, P., Devi, R. S., Bhadouria, R., & Prasad, M. N. V. (2020). Influence of synthetic fertilizers and pesticides on soil health and soil microbiology. In *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation: Pesticides and Chemical Fertilizers* (Capítulo 2, págs. 25-54). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00002-7>

Vázquez MB, Moreno MV, Amodeo MR, Bianchinotti MV. Effects of glyphosate on soil fungal communities: A field study. *Rev Argent Microbiol*. 2021 Oct-Dec;53(4):349-358. doi: 10.1016/j.ram.2020.10.005. Epub 2021 Feb 5. PMID: 33551324.

van Rijssel, S. Q., Veen, G. F. (C.), Koorneef, G. J., Bakx-Schotman, J. M. T. (T.), ten Hooven, F. C., Geisen, S., & van der Putten, W. H. (2022). Soil microbial diversity and community composition during conversion from conventional to organic agriculture. *Molecular Ecology*, 31(15), 3951–3967. <https://doi.org/10.1111/mec.16593>

Vickneswaran, M., Carolan, J. C., Saunders, M., & White, B. (2023). Establishing the extent of pesticide contamination in Irish agricultural soils. *Heliyon*, 9(9), Article e19416. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19416>

Virk, A. L., Shakoor, A., Ahmad, N., Du, H., Chang, S. X., & Cai, Y. (2025). Organic amendments restore soil biological properties under pesticides application. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 210, 106394. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2025.106394>

Walder, F., Schmid, M. W., Riedo, J., Valzano-Held, A. Y., Banerjee, S., Büchi, L., Bucheli, T. D., & van der Heijden, M. G. A. (2022). Soil microbiome signatures are associated with pesticide residues in arable landscapes. *Soil Biology & Biochemistry*, 174, Article 108830. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108830>

Wang, J.-W., Han, C.-T., Wu, D.-M., Zhou, W., Gao, M., & Li, Y.-S. (2025). Microbial composition, assembly, and functional characteristics of generalized and specialized subcommunities under flooded paddy fields: Long-term pesticide versus non-pesticide models. *Frontiers in Microbiology*, 16, Article 1636555. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1636555>

Wang, K., Ren, Y., Pan, X., Wu, X., Xu, J., Zheng, Y., & Dong, F. (2025). Insights on persistent herbicides in cropland soils in northern China: Occurrence, ecological risks, and phytotoxicity to subsequent crops. *Journal of Hazardous Materials*, 490, 137794. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137794>

Wang, X. Q., Liu, J. T., Zhang, N., & Yang, H. (2020). Adsorption, mobility, biotic and abiotic metabolism and degradation of pesticide exianliumi in three types of

farmland. *Chemosphere*, 254, Article 126741.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126741>

Wen, X., Fu, Y. H., Xiang, L. L., He, C., Harindintwali, J. D., Wang, Y., Wei, S. Q., Bian, Y. R., Jiang, X., & Wang, F. (2025). Impact of long-term use of multiple herbicides on soil microbial communities and nutrient cycling across different agricultural land-use types. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 394, Article 109879. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109879>

Wijntjes, C., Weber, Y., Höger, S., Nguyen, K. T., Hollert, H., & Schäffer, A. (2022). Decelerated degradation of a sulfonylurea herbicide in four fungicide-treated soils. *Environmental Science: Advances*, 1(1), 70–82.
<https://doi.org/10.1039/D1VA00021G>

Yasir, M., Hossain, A., & Pratap-Singh, A. (2025). Pesticide degradation: Impacts on soil fertility and nutrient cycling. *Environments*, 12(8), 272.
<https://doi.org/10.3390/environments12080272>

You, X., Jiang, H., Zhao, M., Suo, F., Zhang, C., Zheng, H., Sun, K., Zhang, G., Li, F., & Li, Y. (2020). Biochar reduced Chinese chive (*Allium tuberosum*) uptake and dissipation of thiamethoxam in an agricultural soil. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 121749. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121749>

Yu, Z. T., Lu, T., & Qian, H. F. (2023). Pesticide interference and additional effects on plant microbiomes. *Science of the Total Environment*, 888, Article 164149.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164149>

Zhang, L., Zuo, Q. L., Cai, H., Li, S., Shen, Z., & Song, T. (2024). Fungicides reduce soil microbial diversity, network stability and complexity in wheat fields with different disease resistance. *Applied Soil Ecology*, 201, Article 105513.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105513>

Zhang, W., Li, T., Tang, J., Liu, X., Liu, Y., & Zhong, X. (2022). The profiles of chiral pesticides in peri-urban areas near Yangtze River: Enantioselective distribution characteristics and correlations with surface sediments. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 121, 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.02.001>

Zhang, W., Zhou, X., Ye, Q., Cheng, X., Zhang, S., Yu, Z., & Wang, W. (2023). Nonenantioselective environmental behavior of a chiral antiviral pesticide dufulin in aerobic soils. *Science of The Total Environment*, 877, 163312.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163312>

Zheng, R., Peng, J., Li, Q., Liu, Y., Huang, D., Sheng, Y., Liu, C., Qi, L., Keyhani, N. O., & Tang, Q. (2025). Alterations in microbial community structures and metabolic function in soil treated with biological and chemical insecticides. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 208, 105-113.
<https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2025.01.001>

Zhou, W., Li, M., & Achal, V. (2025). A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage. *Emerging Contaminants*, 11(1), 100410. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100410>

Zuo, W., Zhao, Y., Qi, P., Zhang, C., Zhao, X., Wu, S., An, X., Liu, X., Cheng, X., Yu, Y., & Tang, T. (2024). Current-use pesticides monitoring and ecological risk assessment in vegetable soils at the provincial scale. *Environmental Research*, 246, 118023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.11802>